

# Fortschritte in Konstruktion und Produktion



UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

Herausgeber: Professor Dr.-Ing. Frank Rieg  
Professor Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

**Volker Münster**

## **Technologieentwicklung für die Refabrikation von Einspritzsystemen**









# **Technologieentwicklung für die Refabrikation von Einspritzsystemen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Dipl.-Ing Volker Münster  
aus Prüm

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Steinhilper

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Rieg

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Oktober 2015

Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik  
Universität Bayreuth  
2015



## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Geschäftsführer der BU Drive GmbH, Köln und der Schmitz + Krieger GmbH, Köln aus einer hilfreichen wie wirkungsvollen Symbiose aus wissenschaftlicher Neugier, technischem Sachverstand als diplomierter Ingenieur des Maschinenbaus, aus unternehmerischem Denken und nicht zuletzt aus der über viele Jahre erfolgreichen Forschungskooperation mit der Fraunhofer Projektgruppe Prozessinnovation an der Universität Bayreuth seit 2008 bis heute.

Viele Diskussionen in den eigenen Unternehmen aber auch mit der Industrie und mit verschiedenen Forschungseinrichtungen führten letztendlich zu der Motivation, den Stand der Technik in der Refabrikation professionell in seiner Anwendbarkeit auf ein völlig neues Produkt, die Injektoren der Common Rail Einspritzung, zu analysieren, den Refabrikationsprozess zu entwickeln und die Marktfähigkeit der Refabrikation dieser Injektoren technologisch und kaufmännisch nachzuweisen.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. Rolf Steinhilper für die Ermunterung zur Erstellung dieser Dissertation, für die mehrmalige Durchsicht der Arbeit in ihrer Entwicklung sowie für viele Hinweise und Anregungen, die mir als extern Promovierender eine wertvolle Hilfe waren. Besonderer Dank gilt zudem Herrn Professor Dr. Steinhilper für die Übernahme des Mandats zur Erstellung des Erstgutachtens und Herrn Professor Dr. Rieg für die Erstellung des Zweitgutachtens zur Bewertung dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich vielen Mitarbeitern der von mir geleiteten Unternehmen, hier ganz besonders hervorzuheben die Herren Peter Voosen als Ressortleiter Dieseltechnik der Schmitz + Krieger GmbH, Köln und Robert Casper als Leiter Projektmanagement und Forschung der Unternehmensgruppe. Ihre Unterstützung bei den notwendigen Versuchen und Qualitätstests sowie beim Aufbau von Prüfständen und der Simulation der technischen Prozesse war mehr als hilfreich zur Erarbeitung der hier vorgelegten Erkenntnisse und Ergebnisse.

Für die Niederschrift des Textes und die graphische Umsetzung vieler Manuskripte und Entwurfsskizzen danke ich besonders Frau Marion Voosen. Zudem ermöglichten mir alle führenden Hersteller der instandzusetzenden Neuprodukte eine Einsicht in Ihre Produktion und ihre Prozesse und standen mit wertvollem Rat zur Seite. Hierfür mein Dank.

Meiner Familie danke ich ganz persönlich und ganz herzlich für ihren Verzicht auf gemeinsame Zeit und ihre Unterstützung trotz oft anstrengender Abende und Wochenenden.

Köln, im Oktober 2015

Volker Münster

---



---

# Inhalt

<b>1. Ausgangssituation</b>	<b>1</b>
1.1 Refabrikation/Remanufacturing, Recycling und Ressourcensituation	1
1.2 Signifikante marktgetriebene Veränderungen	2
1.3 Aufwärtsentwicklung des Dieselantriebs	5
<b>2. Themenstellung und Lösungsweg</b>	<b>8</b>
2.1 Problemstellung	8
2.2 Zielsetzung	10
2.3 Vorgehensweise	11
<b>3. Stand der Erkenntnisse</b>	<b>13</b>
3.1 Konstruktiver Aufbau und Funktionsweise von Einspritzsystemen	13
3.1.1 Bereitstellung und Beherrschung höherer Systemdrücke	13
3.1.2 Entkopplung von Druckerzeugung und Dieseleinspritzung	13
3.1.3 Elektronische Einspritzsystemregelung	14
3.1.4 Mehrfach- und Mehrmals-Einspritzung	15
3.1.5 Common Rail Systeme mit Magnetventil-Injektoren	16
3.1.6 Common Rail Systeme mit Piezo-Injektoren	18
3.1.7 Baugruppen und Bauteile von Common Rail Injektoren	20
3.1.8 Pumpe-Düse-Elemente (Unit Injectors)	22
3.2 Refabrikation von Kfz-Ersatzteilen	23
3.2.1 Produkte und Märkte	23
3.2.2 Technologien	25
3.2.3 Optimierungsmethoden	28
3.2.4 Eignungsbeurteilung von Produkten zur Refabrikation	29
3.3 Kfz-Instandhaltung und Kfz-Service-Engineering	29
3.3.1 Paradigmenwechsel	30
3.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung	31
3.3.3 In-situ-Reinigung von Common Rail Injektoren	32
3.4 Qualitätssicherung in der Produktion und Refabrikation	34
3.5 Wertung des Standes der Erkenntnisse	37

<b>4. Untersuchungen und Empfehlungen zu Ausfallursachen, Diagnose, Service und Ausbau von Common Rail Injektoren im Kfz-Handwerk</b>	<b>38</b>
4.1 Systemische Ausfallursachen und Symptomatik	38
4.1.1 Offenkundige Symptome	39
4.1.2 Gezielte Injektoren-Fehlerdiagnose in der Kfz-Werkstatt	41
4.1.3 Schlüsse aus dem Fehlverhalten bei den Abgasemissionen	44
4.1.4 Nicht erkennbare Schäden	45
4.2 Weitergehende Handlungsempfehlungen	46
4.2.1 Intensivierung der Kooperation und Kommunikation zwischen Kfz-Handwerk und Refabrikationsindustrie	46
4.2.2 Reduzierung von Fehler-Fehlinterpretation und vorsorglichem Injektoren-Austausch „auf Verdacht“	48
4.2.3 Nutzung neuer in-situ Injektoren-Reinigungsoptionen im Fahrzeug	51
4.2.4 Erhöhung der Sorgfalt beim Injektoren-Ausbau	53
4.3 Typische Schadensbilder an Injektoren	55
4.3.1 Schäden durch unsachgemäßen Ausbau	55
4.3.2 Schäden aus dem Fahrbetrieb	56
<b>5. Evaluierung der Eignung von Common Rail Injektoren zur Refabrikation/zum Produktrecycling</b>	<b>57</b>
5.1 Technische Kriterien	57
5.2 Mengenkriterien und Logistikaufwand	58
5.3 Wertkriterien	60
5.4 Zeitkriterien	61
5.5 Innovationskriterien/Modernisierungskriterien	63
5.6 Weitere Kriterien	65
5.7 Eigene Kriterien	66
5.7.1 Kriterien der Verfügbarkeit interkontinental importierter ausgemusterter Injektoren	66
5.7.2 Kriterien des Verdrängungswettbewerbs durch Kfz-Ersatzteile aus dritten Quellen	67
5.8 Zusammenfassende Einstufung	68

---

<b>6. Entwicklung der Refabrikationsprozess-</b> <b>schritte zur Teilelegewinnung</b>	<b>71</b>
6.1 Abfolge der Prozessschritte	71
6.2 Refabrikationsumgebung	72
6.3 Beitrag zum Refabrikationserfolg	73
6.4 Entwicklung der Prozessschritte	75
6.4.1 Eingangsprüfung	77
6.4.2 Injektorenreinigung und -spülung	78
6.4.3 Demontage	79
6.4.4 Prüfung und Sortierung	81
<b>7. Entwicklung der Refabrikationsprozess-</b> <b>schritte zur Teilebereitstellung</b>	<b>83</b>
7.1 Abfolge der Prozessschritte	84
7.2 Refabrikationsumgebung	85
7.3 Beitrag zum Refabrikationserfolg	85
7.4 Entwicklung der Prozessschritte	86
7.4.1 Befundung	86
7.4.2 Aufarbeitung	86
7.4.3 Kommissionierung für die Montage	87
<b>7.5 Entwicklung eines dispositiven Optimierungsansatzes</b> <b>zur Senkung von Kosten und Umweltwirkungen seitens</b> <b>der Teilebereitstellung</b>	<b>89</b>
7.5.1 Dispositive Besonderheiten der Refabrikation	89
7.5.2 Begriffliche Festlegungen zum dispositiven Optimierungsansatz	90
7.5.3 Quantifizierung der Baugruppen- und Bauteilflüsse bei identischen Mengen eingelieferter und ausgelieferter Refabrikationsprodukte	90
7.5.4 Gezielte Beeinflussung von Bauteilmengen und Kosten durch bewusste Variationen der Relation von Einlieferungs- menge zu Auslieferungsmenge refabrizierter Injektoren.	93
7.5.5 Bestimmung einer für die Injektoren-Refabrikation bestgeeigneten Relation von Einlieferungs- zu Auslieferungsmenge	97

<b>8. Entwicklung der Refabrikationsprozess-</b> <b>schritte zur Erzeugnismontage mit Endprüfung und Codierung ...</b>	<b>103</b>
8.1 Abfolge der Prozessschritte .....	103
8.2 Refabrikationsumgebung .....	104
8.3 Beitrag zum Refabrikationserfolg .....	104
8.4 Entwicklung der Prozessschritte .....	104
8.4.1 Wiedermontage .....	105
8.4.2 Endprüfung .....	107
8.4.3 Codierung .....	110
<b>9. Synthese der Entwicklungen .....</b>	<b>112</b>
<b>10. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>114</b>
<b>11. Conclusion and Outlook .....</b>	<b>117</b>
<b>12. Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>120</b>
<b>13. Symbolverzeichnis .....</b>	<b>121</b>
<b>14. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>122</b>
<b>15. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>125</b>
<b>16. Anhang .....</b>	<b>128</b>
16.1 Zahlengrundlagen der Abbildung 39 .....	128
16.2 Zahlengrundlagen der Abbildung 40 .....	129
16.3 Grenzmuster für Befundung und Aufarbeitung .....	130
16.3.1 Aktormodul .....	130
16.3.1 Injektorkörper .....	131
16.3.1 Düsenadelbewegung .....	132
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>134</b>







# 1. Ausgangssituation

## 1.1 Refabrikation/Remanufacturing, Recycling und Ressourcensituation

*Refabrikation:* dieser zur Jahrtausendwende an der Universität Bayreuth neu geprägte Begriff hat der hiesigen Austauschindustrie – so auch dem Unternehmen, für das der Verfasser arbeitete – nach Jahrzehnten der Suche nach einem geeigneten deutschsprachigen Pendant für die seit den 1940er Jahren geläufige angloamerikanische Vokabel *Remanufacturing* – schlussendlich eine griffige Bezeichnung für unser Tun beschert: qualitätsgesichertes „Aus Alt mach Neu“ von Kfz-Ersatzteilen in Serie bzw. in industriellen produktionstechnischen Maßstäben.

Refabrikation gleich Remanufacturing zählt innerhalb des *Recycling* (einer angloamerikanischen Vokabel, die sich auch im deutschen wie internationalen Sprachgebrauch durchaus bereits verfestigt hat – gleichwohl sprechen unsere belgischen und französischen Nachbarn von „Recyclage“) zur Verfahrensgruppe des *Produktrecycling*. Gemeinsam mit der zweiten Verfahrensgruppe *Materialrecycling* leitet Recycling einen erheblichen Beitrag zur Entlastung beim Wachstum unserer Verbräuche an unverzichtbaren Rohmaterialien für die Industrie. Die alternativ teils gesellschaftlich, teils gesetzgeberisch favorisierte Prioritätenkaskade: *Vermeiden vor Vermindern vor Verwerten* wird angesichts der Wachstumsprognosen zur weltweiten Produktion von Kraftfahrzeugen und vielfach noch geringen Motorisierungsgraden vorerst nicht greifen, Abbildung 1.

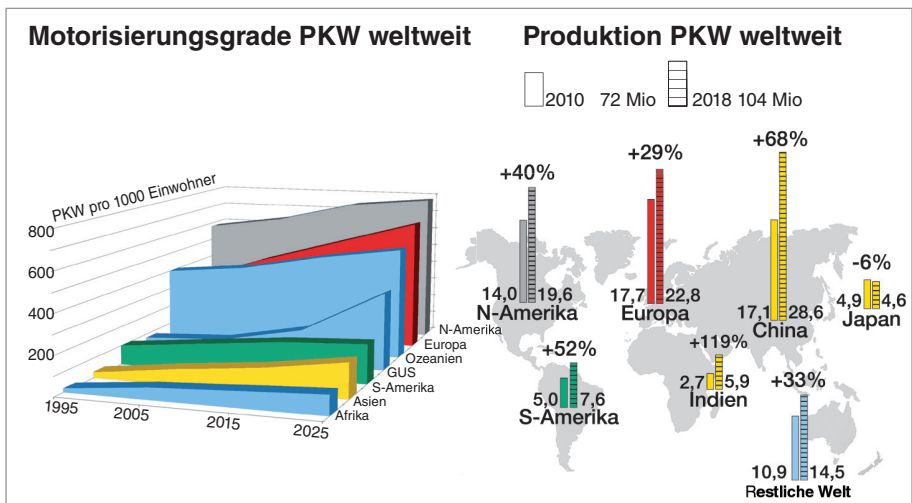


Abbildung 1: Motorisierungsgrade und Produktion PKW weltweit

Quelle: eigene Recherchen

Die Refabrikation ist hinsichtlich ihres energetischen und substantiellen Wirkungsgrades die effizienteste Form des Recycling [STE99]. Sie verdient dementsprechend auch den höchsten Aufmerksamkeitsgrad und zugehöriges Engagement, dem sich auch die vorliegende Arbeit verpflichtet fühlt. Hierbei ist die Ausgangssituation allerdings von vier signifikanten marktgetriebenen Veränderungen gekennzeichnet, die die Anforderungen an zu entwickelnde Lösungen stark beeinflussen bzw. merklich erhöhen:

## 1.2 Signifikante marktgetriebene Veränderungen

Die – in entwickelten Ländern mit hoher Beschäftigung inzwischen vollzogene – Wandlung vom Verkäufer- zum Käufermarkt [RAU10] hat sowohl in der Automobilindustrie als auch in der Kfz-Servicebranche zu signifikanten Veränderungen geführt:

*Produktindividualisierung:* der Wettbewerb um den immer anspruchsvolleren Kunden brachte eine weitgehende Abkehr von den Prinzipien gleichförmiger Großserienproduktion mit ihren Produktivitätsvorteilen aufgrund starker Arbeitsteilung und Größendegression der Kosten. An deren Stelle trat eine Hinwendung zur Erzeugung kundenauftragsindividueller Fahrzeugvarianten: So pendelte in einem betrachteten 15-Jahre-Zeitraum in stagnierenden Märkten die Steigerung der Produktionsmenge nur unerheblich um den 100%-Wert, während die Zahl der Produktvarianten um 500 bis 780% anstieg [FRI12], Abbildung 2.

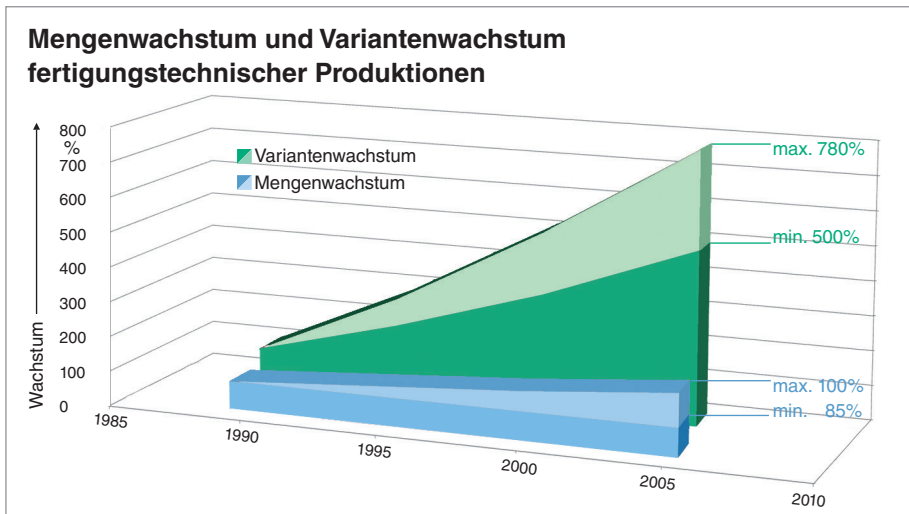


Abbildung 2: Mengenwachstum und Variantenwachstum fertigungstechnischer Produktionen,  
Quelle: Fritsche

Bezogen auf die Variationsbreite heutiger Fahrzeuge findet sich etwa in [HAU11] gleich auf der ersten Seite der Hinweis, dass es für das Automobilmodell Audi A6 18.819 Varianten der Türverkleidung und 152 Varianten des Handschuhkastendeckels gibt – in diesem Zusammenhang überrascht es nicht mehr, dass heute jeder produzierte PKW der Oberklasse seinen individuellen, ausstattungs- bzw. kundenwunschabhängigen Kabelbaum hat. Dies führt zu erheblichen logistischen Konsequenzen nicht nur in der Zuliefer- und Herstellungskette, sondern insbesondere für alle Kfz-Service Akteure und hier vor allem für das Refabrikationsunternehmen, das für ein betroffenes Fahrzeug individuell passende Austauschteile anbieten können muss.

*Verbrauchsreduzierung:* Der Wettbewerb um kosten- und umweltbewusste Kunden sowie die europäischen Vorgaben zur Verbrauchs-, Emissions- und CO<sub>2</sub>-Reduzierung führten zu erheblichen Anstrengungen der Fahrzeug- und Komponentenhersteller bezüglich der Verminderung spezifischer Kraftstoffverbräuche von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor: Leichtbau zur Reduzierung bewegter Massen, konstruktiv höchst aufwendige Optimierungen des Ladungswechsels, elektronisches Motormanagement sind einige, diese Anstrengungen kennzeichnende Entwicklungen, in denen Common-Rail-Einspritzsysteme eine zentrale Rolle innehaben. Hieraus ergeben sich gleichfalls erhebliche Konsequenzen für den Kfz-Servicesektor, die auch zu beträchtlichen Steigerungen der Anforderungen an Refabrikationsunternehmen geführt haben und noch führen werden.

*Informationszurückhaltung:* Ihr wettbewerbsentscheidendes Vorsprungwissen nicht nur zu neuen Höchstleistungswerkstoffen oder innovativen Herstellverfahren verbrauchsbestimmender Motorkomponenten, sondern auch bezüglich des elektronischen Managements von Kraftstoffzumessung und Verbrennungsvorgang hüten die Entwickler und Produzenten auf höchster Geheimhaltungsstufe. Dies spürt der gesamte Kfz-Servicesektor und insbesondere die Refabrikationsindustrie inzwischen schmerzlich, da sie immer größere Anstrengungen unternehmen muss, um weiterhin auf einem Know-how-Niveau zu operieren, das dem vom Service- (bzw. Ersatzteilbedarfsfall) Betroffenen die technisch überzeugende und wirtschaftlich angemessene Lösung bieten kann. Hierbei keimt allenfalls eine leise Hoffnung auf Erleichterungen. Gesetzgeberische Initiativen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene, wie die deutsche Gruppenfreistellungsverordnung GVO, die europäische Block Exemption Regulation BER oder der US-amerikanische Right-to-Repair-Act [STE12a] zielen zwar darauf ab, dem Kfz-Servicesektor den Zugang zu servicerelevanten Produktinformationen zu eröffnen, doch spürt die Praxis hier bislang zu wenig Fortschritte, da die Informationszurückhaltung der Hersteller wohl mindestens so sehr vom Schutzbedürfnis gegenüber den eigenen Wettbewerbern getrieben sein dürfte wie von der Sorge vor zu vielen zusätzlichen Marktteilnehmern im Servicebereich.

**Beschleunigte Innovationszyklen und Sortimentserweiterungen:** Vor nicht allzu langer Zeit hatte die Vorstellung eines von Grund auf neu entwickelten Automobils noch Seltenheitswert oder Sensationscharakter auf den einschlägigen Automobilmesse. Inzwischen überbieten sich die Hersteller mit einem (Zitat) „Feuerwerk neuer Modelle“. Aus ihrer Sicht darf keine IAA in Frankfurt, kein Genfer Automobilsalon, keine Detroit Motor Show und keine IAA in Shanghai vergehen, auf der sie nicht mit mindestens einem neuen Fahrzeugmodell aufwarten - und dies in immer größerer Häufigkeit und in kürzeren Abständen bzw. Innovationszyklen. Aus Sicht eines Unternehmens der herstellerunabhängigen Refabrikationsindustrie, das marken- und modellreihenübergreifend Austauschteile für die Kfz-Servicebranche produziert, bringt dies eine ungeheure und beschleunigt ansteigende Sortimentsvielfalt mit sich – und zwar zusätzlich zu der das Refabrikationsunternehmen ohnehin schon stark fordernden Prozessvielfalt, Abbildung 3, die Haumann in [HAU11] unlängst trefflich beschrieben hat.

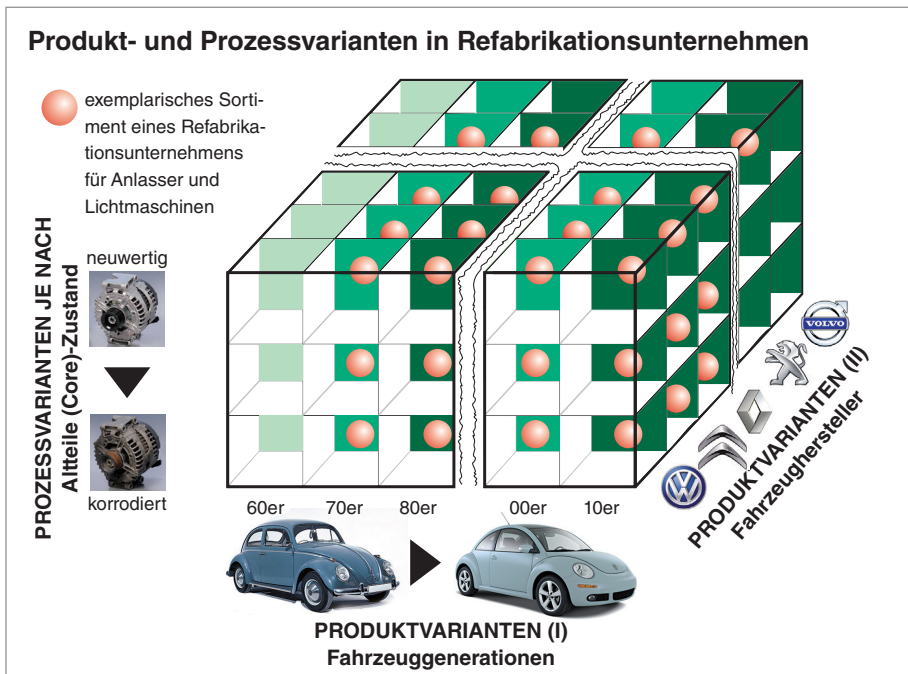


Abbildung 3: Produkt- und Prozessvarianten in Refabrikationsunternehmen,  
 Illustrationsquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Alteile, Fahrzeuge)

### 1.3 Aufwärtsentwicklung des Dieselantriebs

Im Jahre 1893 reichte Rudolf Diesel, der seit 1875 bei Nicolas Carnot und Carl von Linde studiert hatte, eine Patentschrift in Berlin ein, die das Kaiserliche Patentamt mit der Urkunde Nr. 67207 anerkannte, Abbildung 4.

#### Patentschrift, Rudolf Diesel und erster Dieselmotor



Abbildung 4: Rudolf Diesel

Damit war die Beschreibung eines motorischen Wirkprinzips dokumentiert, welches die das Industriezeitalter seit gut 100 Jahren dominierende Dampfmaschine (und möglicherweise auch den noch in den Kinderschuhen steckenden Ottomotor) ablösen sollte.

Es dauerte – nach zahlreichen Fehlschlägen und Rückschlägen – jedoch noch drei weitere Jahre, bis 1896 der erste funktionsfähige und haltbare Dieselmotor auf dem Prüfstand lief. Der Dieselmotor wurde offiziell als effizientester verfügbarer Antrieb zertifiziert, gewann den Grand Prix der Weltausstellung 1900 in Paris und begleitete die Industrialisierung ins 20. Jahrhundert.

Rudolf Diesel hatte einen Motor konzipiert, dessen Wirkprinzip aufgrund seiner bemerkenswerten Wirtschaftlichkeit sich als Antrieb für Schiffe, Lokomotiven, Nutzfahrzeuge sowie stationäre Applikationen durchsetzte. Auch in Personenwagen fanden Dieselmotoren ab 1936 [BOS99] Anwendung – hier war deren Wirtschaftlichkeit zwar ebenfalls willkommen, doch fristeten Dieselmotoren mit ihrer geringen Literleistung und ihrem überschaubaren Drehmoment in PKW lange Zeit ein Schattendasein neben den diesbezüglich bevorzugten dynamischeren Ottomotoren. Erst kurz vor der Wende des 20. zum 21. Jahrhundert, als es einem Forscherteam der FIAT-Gruppe, aufbauend auf Forschungen an der ETH Zürich seit 1976, gelang, mit Hilfe neu entwickelter Hoch-

druckpumpen, Einspritzdüsen und einem gemeinsamen Hochdruckspeicher („Common Rail“) mit vervielfachten Einspritzdrücken den Dieselmotor zu betreiben [WIK15], stellte dieser nun seinerseits den Ottomotor in den Schatten. Die Beherrschung der Großserienproduktion der neuen hochpräzisen, hochbelasteten, eng tolerierten neuen Komponenten (insbesondere der Einspritzdüsen bzw. Injektoren) barg jedoch eine weitere signifikante Herausforderung, deren Bewältigung in Europa zuerst dem Unternehmen Bosch, das die FIAT-Patente erworben hatte, gelang [WIK15].

Damit kehrte sich die Situation geradezu um: Dieselmotoren ermöglichten – bei weiterhin überlegener Wirtschaftlichkeit – nunmehr Literleistungen und Drehmomente, die jene von vergleichbaren Ottomotoren erreichten oder sogar übertrafen, Abbildung 5.

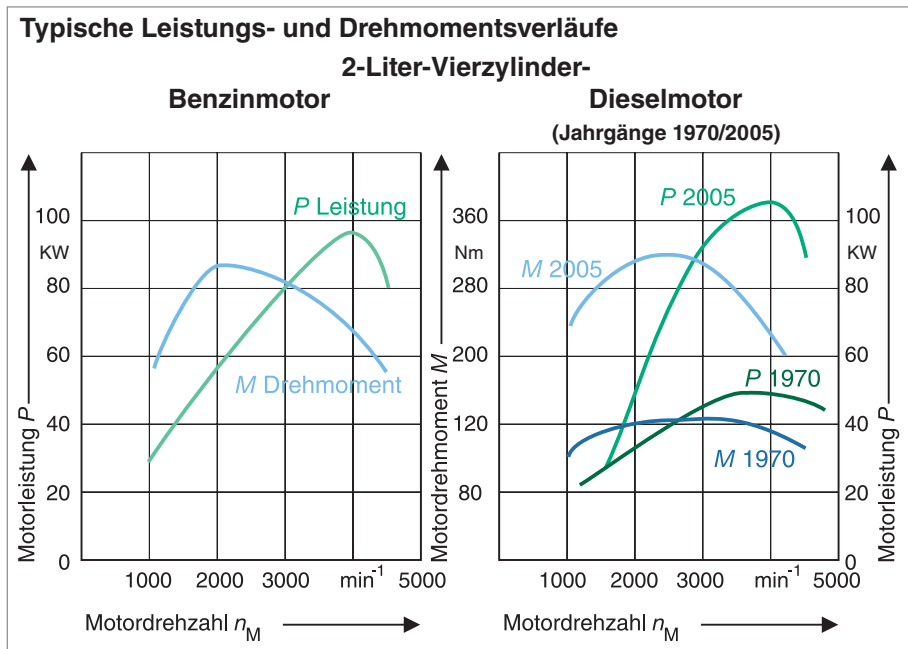


Abbildung 5: Typische Leistungs- und Drehmomentsverläufe 2-Liter-Vierzylinder-Benzinmotor/Dieselmotor, Quellen: EUROPA Lehrmittel, BOSCH

In der Folge beläuft sich der Marktanteil von Personenwagen mit Dieselmotor in einigen Ländern zwischenzeitlich auf Größenordnungen von 50% oder mehr, Abbildung 6.

Einflussgrößen hierauf sind neben dem Käuferwillen die Verfügbarkeit hochreinen Diesel-Kraftstoffs, der (steuerlich determinierte) Dieselpreis an den Tankstellen im Vergleich zum Benzinpreis sowie nicht zuletzt auch die Produktionskapazitäten der Hersteller.



## PKW-Bestände und Dieselanteile 2015 in ausgewählten Regionen

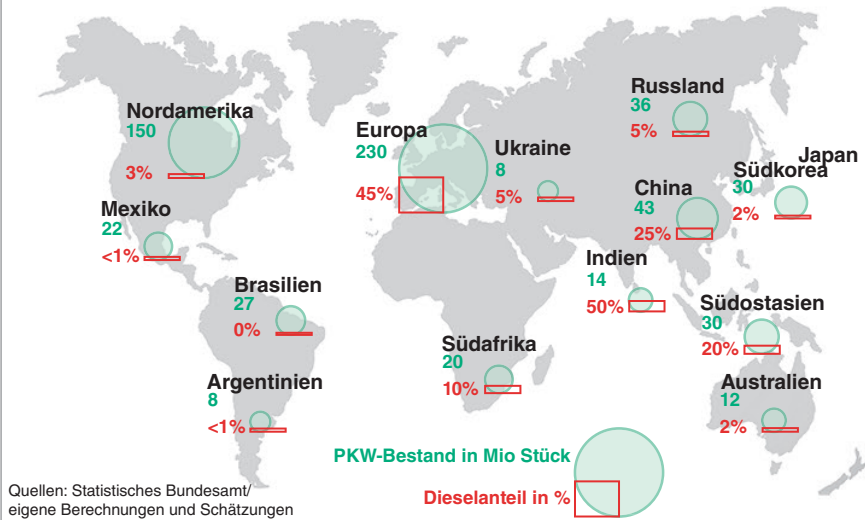


Abbildung 6: PKW-Bestände und Dieselanteile 2015 in ausgewählten Regionen, weltweit

Per Saldo befinden sich inzwischen in Europa einhundert Millionen Fahrzeuge mit Common-Rail-Einspritzsystemen im Verkehr, davon ein gutes Fünftel in Deutschland.

Der After-Sales-Service, die Ersatzteilversorgung und insbesondere die Refabrikation dieser hochbelasteten Einspritzsystemkomponenten, die aufgrund ihrer hohen Beanspruchung bei großer Sensibilität schon als „Verschleißteile der Zukunft“ bezeichnet werden [JAK12], muss sich dieser Situation stellen und Lösungen bereit stellen – und zwar neue Lösungen:

Die Refabrikationsindustrie hat nämlich derzeit gleich zwei Paradigmenwechsel zu bewältigen:

Zum einen die Transition von der Aufarbeitung bisher rein mechanischer oder elektrischer Systeme hin zu komplexen mechatronischen oder elektronischen Systemen.

Zum anderen die Transition von der Bearbeitung von Komponenten aus klassischen/geläufigen Werkstoffen mit Toleranzbändern im Zehntel- bis Hundertstel-Millimeterbereich, hin zu Komponenten aus neuen Werkstoffen mit Toleranzbändern im Tausendstel-Millimeterbereich, bisher ungekanntem und teils unbekanntem Verschleißverhalten, sowie einer gegenüber klassischen Austauschteilen potenzierten Anfälligkeit gegen Kontaminationen/Verschmutzungen.

Die vorliegende Arbeit soll hierzu am Beispiel von Common-Rail-Einspritzsystemen, und hier insbesondere Common-Rail-Injektoren einen Beitrag liefern.

## 2. Themenstellung und Lösungsweg

## 2.1 Problemstellung

Resultierend aus den im Kapitel „Ausgangssituation“ charakterisierten aktuellen Entwicklungen stellt sich die Problemstellung aus ingenieurwissenschaftlich fokussierter Sicht so dar, dass

- die in der Größenordnung einer Zehnerpotenz verfeinerten Toleranzbänder der Fabrikation und Refabrikation von Common-Rail-Injektoren, Abbildung 7

sowie

- die fehlende Verfügbarkeit vollständiger, für die Refabrikation relevanter Produkt-Informationen zu Common-Rail-Injektoren

eine seitens der Serviceakteure und Servicekunden wünschenswerte industrielle Refabrikationspraxis für Injektoren erschwert bzw. hemmt.

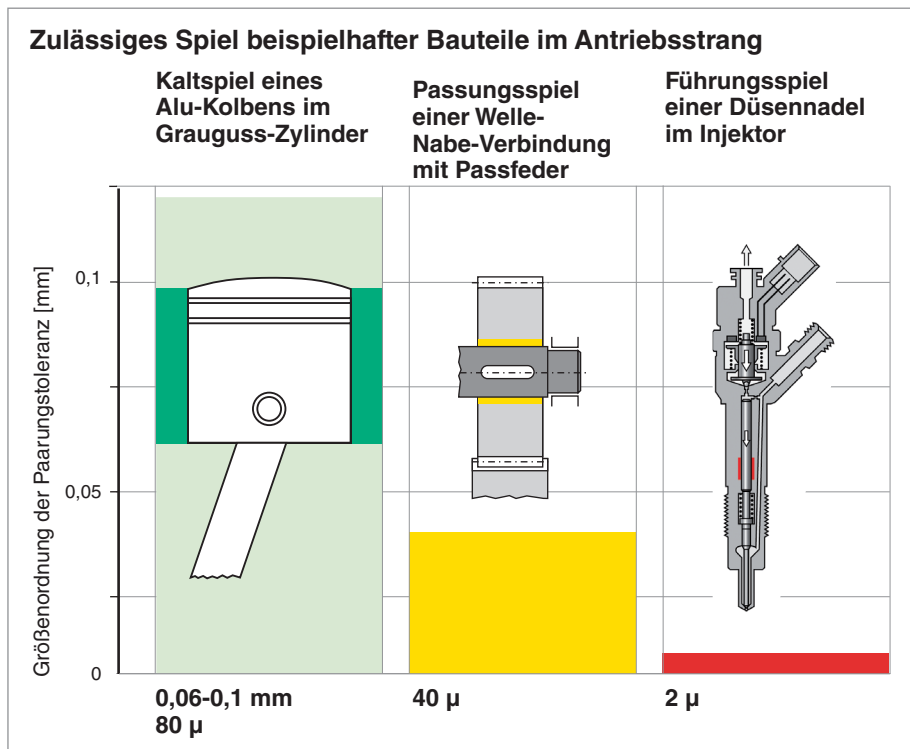


Abbildung 7: Zulässiges Spiel beispielhafter Bauteile im Antriebsstrang

Bildquellen: Handbuch der Konstruktion, Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

Daher sind bislang – gemessen an der Zahl im Markt befindlicher Komponenten und verglichen mit Kfz-Komponenten ähnlich großen Refabrikationsbedarfs – lediglich auffällig wenige herstellerunabhängige Refabrikationsunternehmen in diesem Sektor tätig, da sie sich offenkundig nicht an die erforderliche Technologie heranwagen, Abbildung 8.

### Anzahl Kfz-Komponenten der PKW im Verkehr in Deutschland vs. Anzahl zugehöriger Refabrikations-/„Reparatur-“ Unternehmen

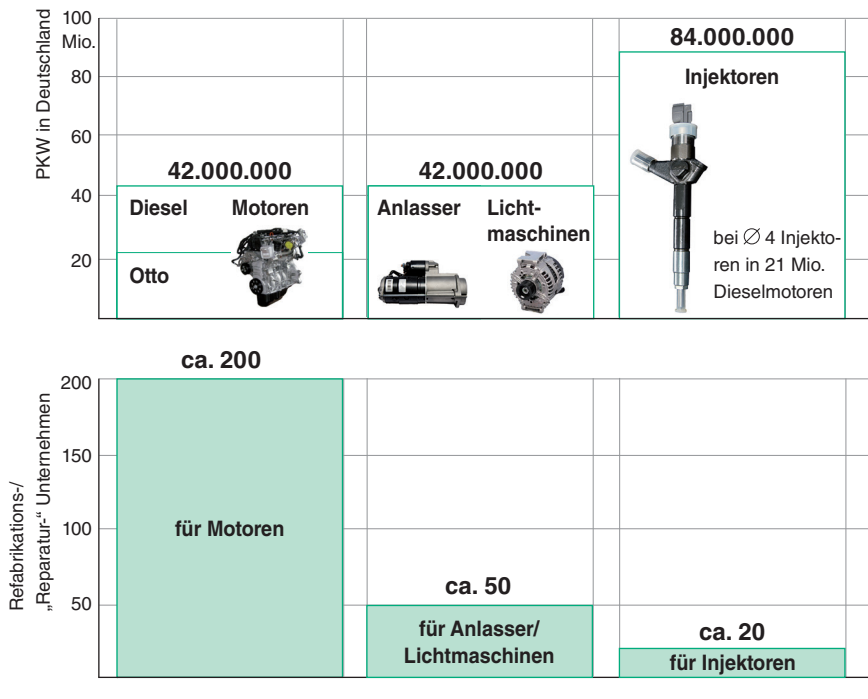


Abbildung 8: Anzahl Kfz-Komponenten der PKW im Verkehr in Deutschland vs. Anzahl zugehöriger Refabrikations-/„Reparatur-“ Unternehmen, Illustrationsquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Teile)

## 2.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit nennt der Titel des vorliegenden Werkes bereits expressis verbis: die Entwicklung von Technologien zur Refabrikation von Einspritzsystemen. Dieses Ziel wird verfolgt, wobei die Vokabel *Technologie* in ihrer originären linguistischen Bedeutung zum Tragen kommt: Ebenso wie der Begriff *Bio-logie* (altgriechisch) das *Wissen um das Leben* verkörpert, ist hier mit *Techno-logie* das *Wissen um die Technik* adressiert, um eine Refabrikation von Einspritzsystemen industriell zu etablieren. Ein Großteil des erarbeiteten Wissensfortschritts sollte dann zugehörig auch als bereits in dem vom Verfasser geleiteten Unternehmen als verwirklicht vorgestellt werden können. Ein weiterer Teil kann aber auch „nur“ in die Zukunft weisen, da an seine Verwirklichung noch die Überwindung weiterer technischer Hürden und/oder die Erklimmung der wirtschaftlichen Voraussetzungen für profitables unternehmerisches Tun geknüpft sind.

Die Refabrikation von Einspritzsystemen, hier dargestellt an den anspruchsvollsten Teilsystemen, den Injektoren, muss

- sich unternehmerisch rechnen
- technisch durchführbar sein

Das Ziel der Arbeit ist somit zweiteilig

- die Nutzen-/Aufwand-Relation der Refabrikation von Common-Rail-Injektoren angesichts deren zusätzlicher Herausforderungen ist wissenschaftlich systematisch und umfassend zu evaluieren
- Technologien zur Refabrikation von Common-Rail-Injektoren sind zu entwickeln, die insbesondere in mittelständischen Unternehmen prozesssicher beherrschbar und wirtschaftlich tragbar sind, wobei dieses Teilziel die Ausarbeitung von
  - Demontage-/Montagetechnologien
  - Befundungstechnologien
  - Reinigungstechnologien
  - Diagnosetechnologien
  - Aufarbeitungstechnologien
  - Prüftechnologien

beinhaltet bzw. erfordert.

Resultierend soll eine fundierte Grundlage sowohl für unternehmerische Investitionsentscheidungen als auch ingenieurwissenschaftliche Gestaltungsentscheidungen zur technischen Auslegung der Refabrikation von Common-Rail-Einspritzsystemen erarbeitet werden.

## 2.3 Vorgehensweise

Zur Erreichung der genannten Ziele wurde für die vorliegende Arbeit zunächst und fortlaufend der Stand der Technik und der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Thema analysiert und dokumentiert (Kapitel 3), um dann direkt das zuvor erstgenannte Teilziel mit zwei Kapiteln anzugehen. Zum einen umfangreiche Untersuchungen im einschlägigen Kfz-Handwerk betreffend die Analyse typischer Schadensbilder bzw. Ausfall- und Aussonderungsursachen von Common-Rail-Injektoren sowie Ausarbeitungen zu Kommunikations- und Kooperationsmöglichkeiten beim Kfz-Service (Kapitel 4), zum anderen die fundierte Evaluierung der Eignung von Common-Rail-Komponenten, insbesondere Common-Rail-Injektoren, zur Refabrikation, um daraus eine Prognose eines zugehörigen neuen Geschäftsfeldes für ein einschlägiges mittelständisches Refabrikationsunternehmen zu erarbeiten (Kapitel 5).

Nach diesen beiden eigenen Beiträgen zum Erkenntnisfortschritt werden dann die Einzelaufgaben des zweiten Teilziels in drei weiteren Kapiteln angegangen: beginnend mit der Klärung der schon vor Aufnahme des eigentlichen Refabrikationsprozesses auftretenden Altteile-Einstufungs- sowie -Akzeptanzbeurteilungsfragen sowie weiterführend mit der Durchführung und Auswertung von Versuchsreihen und Messungen zu den Themenbereichen Demontage/Montage, Reinigung, Diagnose, Aufarbeitung und Prüfung (refabrikationslogistisch gegliedert in Teilegewinnung, Teilebereitstellung und Erzeugnismontage Kapitel 6 bis 8) entsteht so ein Katalog zugehöriger Technologieentwicklungen und eine Zusammenführung der entwickelten Lösungen als Synthese der Entwicklungen (Kapitel 9).

Die Arbeit enthält dann noch die Zusammenfassung der Erkenntnisse sowie einen Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen, in deutscher und englischer Sprache (Kapitel 10 und 11).

Den beschriebenen, in der Arbeit als Vorgehensweise verfolgten Lösungsweg veranschaulicht Abbildung 9.

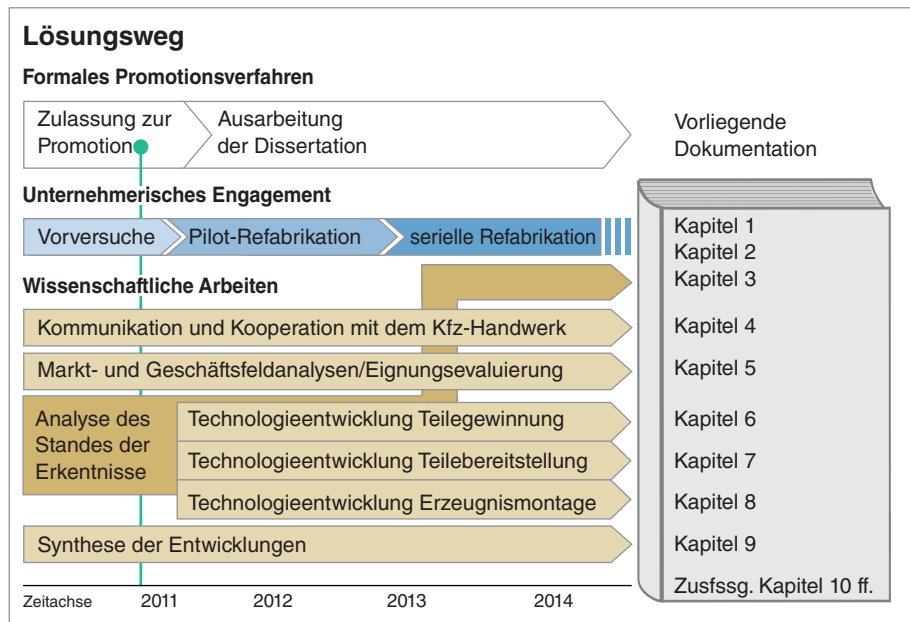


Abbildung 9: Lösungsweg

## 3. Stand der Erkenntnisse

### 3.1 Konstruktiver Aufbau und Funktionsweise von Einspritzsystemen

Common Rail Einspritzsysteme und insbesondere Common Rail Injektoren, wie sie heute Stand der Technik sind und den After-Sales-Service, bzw. hier insbesondere die Refabrikationsindustrie fordern, verdanken ihre Existenz drei signifikanten, in der zurückliegenden Ingenieursgeneration erfolgreich bewältigten Entwicklungspfaden:

- Bereitstellung und Beherrschung bemerkenswert höherer Systemdrücke
- Entkopplung von Druckerzeugung und Deseleinspritzung (räumlich und zeitlich)
- elektronische Einspritzsystemregelung (EDC = Elektronik Diesel Control).

Diese sollen nachstehend kurz charakterisiert werden.

#### 3.1.1 Bereitstellung und Beherrschung höherer Systemdrücke

Durch Entwicklung leistungsfähiger Hochdruckpumpen [REI10], zugehöriger Regelventile und Zumesseinheiten konnte der für die Deseleinspritzung zur Verfügung stehende Einspritzdruck in den vergangenen Jahren sukzessive auf Größenordnungen in den Bereichen 1500 bar/1800bar/2200 bar erhöht werden, wobei inzwischen auch Systemdrücke bis zu 3000 bar als erreichbar und/oder erstrebenswert genannt werden. Damit einher gingen Entwicklungen für hochfeste Druckspeicher (engl. „Rail“ = Schiene) druckbeständige und leakagefreie Leitungen, deren Anschlüsse jedoch im Kfz-Service bei Bedarf mehrfach demontierbar und montierbar sind, sowie insbesondere zugehörige Injektoren und deren Einspritzdüsen (vgl. Unterabschnitt 3.1.5 bis 7).

#### 3.1.2 Entkopplung von Druckerzeugung und Deseleinspritzung

Bei Common Rail Einspritzsystem ist - im Gegensatz zum klassischen vorherigen Dieselpinzip - die Druckerzeugung für die Einspritzanlage von der jeweiligen Einspritzung unter hohem Druck in einen Brennraum zeitlich völlig entkoppelt. Die Hochdruckpumpe erzeugt einen vom Motorsteuergerät fahrzustandsabhängig bestimmten Systemdruck unabhängig von Motordrehzahl und Einspritzmenge und hält diesen im Common Rail bereit. Hierbei macht man sich die Tatsache zunutze, dass der Dieselpkraftstoff bei derart hohen Drücken kompressibel ist.

Die Injektoren bedienen sich aus dem Common Rail Druckspeicher und werden bezüglich Einspritzbeginn, Anzahl Einspritzungen, Einspritzmengen und Einspritzende gleichfalls vom Motorsteuergerät befehligt. Pro Einspritzvorgang, d. h. pro Arbeitstakt des betreffenden Zylinders, sind beim Stand der Technik eine Voreinspritzung (zur Mil-

derung des Nagelns), bis zu fünf Haupteinspritzungen (bei hohen Motordrehzahlen noch bis zu drei) sowie eine Nacheinspritzung zur Verbesserung der Abgasqualität gängige Praxis. Dies alles geschieht in einer Zeitspanne von wenigen tausendstel Sekunden, wobei die Literatur [RE10] schon bis zu acht einzelne Haupteinspritzungen pro Einspritzvorgang als Nahziel nennt.

### 3.1.3 Elektronische Einspritzsystemregelung

Die elektronische Einspritzsystemregelung, für die sich auch in der einschlägigen deutschsprachigen Literatur [RE10] die angloamerikanische Abkürzung EDC (Electronic Diesel Control) etabliert hat, fußt auf einem komplexen Netzwerk von Sensoren, Sollwertgebern, Schnittstellen und Aktoren (Stellern), deren Herzstück das Motorsteuergerät ist (vgl. später Abbildung 25 in Abschnitt 4.1.).

Das Motorsteuergerät bestimmt den erforderlichen Raildruck und befiehlt die Injektoren hinsichtlich Einspritzbeginn, Einspritzmengen usw. (vgl. voriger Unterabschnitt) und stützt sich hierbei auf die beiden Hauptsteuergrößen Last und Drehzahl sowie auf

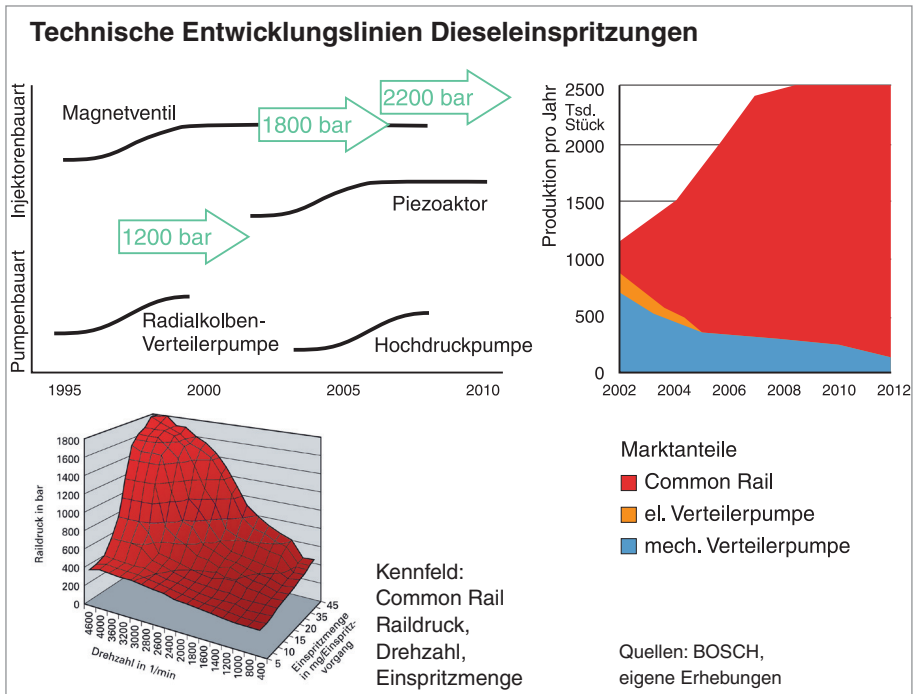


Abbildung 10: Technische Entwicklungslinien Dieseleinspritzungen

Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel



eine Reihe von Korrektursteuergrößen; u. a. die Motortemperatur, die Kraftstofftemperatur, den Ladedruck, die Ansauglufttemperatur und einiges mehr [GSC13].

Zugrunde liegt stets ein auf den jeweiligen Motortyp abgestimmtes Kennfeld mit den drei Dimensionen Drehzahl, Raildruck und Einspritzmenge, welches bei der Motorenentwicklung festgelegt bzw. optimiert wird.

Abbildung 10 illustriert die Ausführungen der ersten drei Unterabschnitte dieses Kapitels zum Stand der Technik bei Common Rail Systemen im Überblick.

### 3.1.4 Mehrfach- und Mehrmals-Einspritzung

Wichtigster Leitgedanke beim Betrieb von Common Rail Einspritzsystem ist es, mit den ihnen eigenen hohen System- und Einspritzdrücken den Dieseldieselkraftstoff in sehr kleine Tröpfchen zu zerstäuben, ihn dadurch schneller und vollständiger zu verbrennen und somit die Zeiten der rußenden und stinkenden Dieselantriebe hinter sich zu lassen.

Diesem Leitgedanken folgend, teilt man die Gesamt-Einspritzmenge pro Verbrennungstakt beim modernen Dieselmotor noch weiter auf: einerseits mithilfe sogenannter Mehrlochdüsen in mehrere einzelne winzige Kraftstoffstrahlen in sternförmiger Anordnung; andererseits durch Aufteilung des Einspritzvorgangs in eine Voreinspritzung, mehrere Haupteinspritzungen und meist noch eine Nacheinspritzung zur prophylaktischen Abgasverbesserung.

Abbildung 11 [GSC13] zeigt exemplarisch den in einem Versuchsmotor aufgenommenen Einspritz- und Verbrennungsvorgang bei Verwendung einer Sechsllochdüse und getrennten Vor- und Haupteinspritzungen.

Zu erkennen ist in Abbildung 11 gleichfalls die Tatsache, dass moderne Dieselmotoren mit Luftüberschuss betrieben werden; d. h. es gibt „magere Bereiche“, insbesondere zur Zylinderwand hin, deren Kraftstoff-Luft-Gemisch nicht „Diesel-gemäß“ von selbst zünden würde, jedoch aufgrund der Voreinspritzung und dem fetten Bereich im Brennrauminneren mit entflammt werden. Zugehörig ist in Abbildung 11 auch eine isolierende Luftschicht zur Zylinderwand hin (als Extremfall der mageren Bereiche) markiert, die unter anderem dafür ursächlich ist, dass Common Rail Dieselmotoren weniger (Verlust-) Wärme über die Zylinderwand an das Kühlwasser abgeben, weshalb sie insbesondere im Teillastbereich einen höheren thermodynamischen Wirkungsgrad haben als etwa Ottomotoren mit weitgehend homogener Gemischzusammensetzung und Temperaturverteilung im Brennraum. Weiterführende Hinweise hierzu enthält die Literatur [GSC13]. Im Kontext der vorliegenden Arbeit interessieren primär der konstruktive Aufbau und die Arbeitsweise von Einspritzsystemen und Injektoren, die die geforderte schnelle Abfolge von Mehrfach- und Mehrmals-Einspritzungen zu bewältigen und zu beherrschen haben.

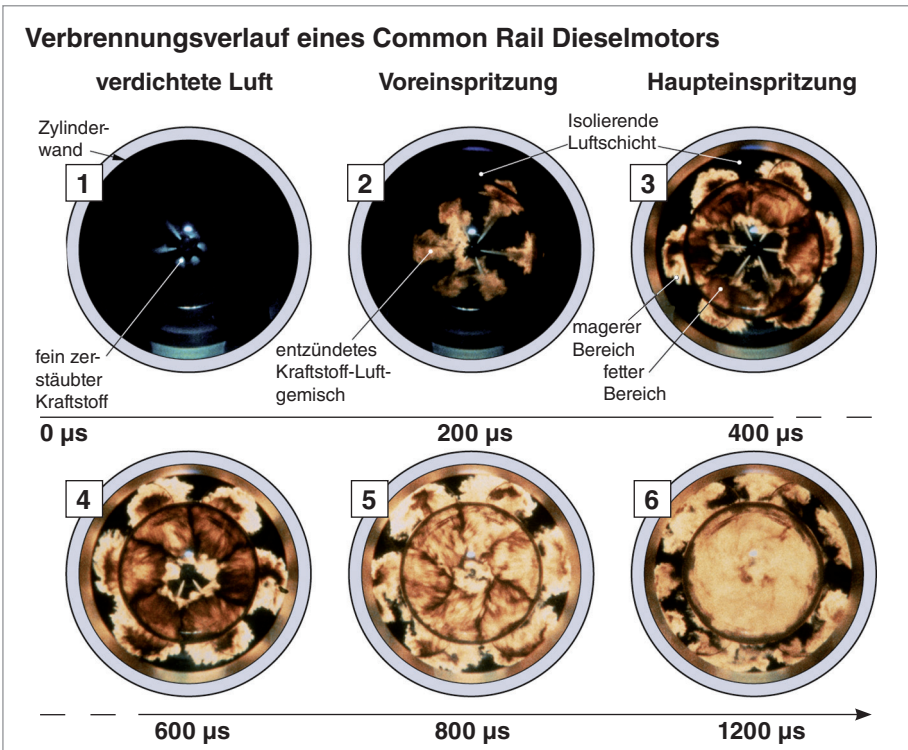


Abbildung 11: Verbrennungsverlauf eines Common Rail Dieselmotors mit Voreinspritzung,  
Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

### 3.1.5 Common Rail Systeme mit Magnetventil-Injektoren

Common Rail Systeme der (sogenannten) ersten Generation arbeiten mit Magnetventil-gesteuerten Injektoren und verfügen über zwei Druckbereiche:

- einen Hochdruckbereich (Größenordnung 300 bis 1500 bar) mit Hochdruckpumpe, Hochdruckleitungen, dem Common Rail und je einem Injektor pro Zylinder
- einem Niederdruckbereich (Größenordnung 0,2 bis 5 bar) mit Kraftstoffförderung aus dem Dieseltank inkl. dessen Vorwärmung und Filterung, Kraftstoffrückführung von der Hochdruckpumpe und den Injektoren inkl. dessen Kühlung zurück in den Dieseltank.

Eine elektronische Steuerung (EDC; vgl. Unterabschnitt 3.1.3) mit zahlreichen Sensoren und als wichtigsten Akteuren dem Raildruckregelventil, den Magnetventilen der Injektoren und dem elektrischen Abschaltventil befehligt das Gesamtsystem bezüglich

Raildruck und Einspritzvorgängen entsprechend den Sollwerten eines Kennfeldes (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 12 zeigt ein solches Common Rail System mit Magnetventil-Injektoren schematisch für einen Vierzylinder-Reihenmotor.

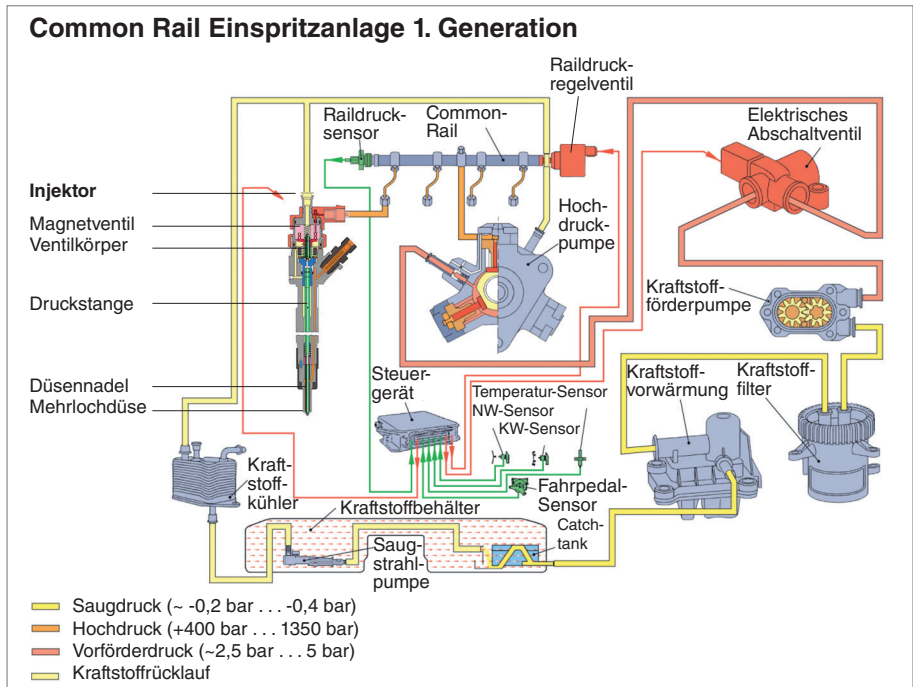


Abbildung 12: Common Rail Einspritzanlage 1. Generation

Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

Weitere Details zur Funktionsweise, Steuerung und Regelung enthält die Literatur [REI10], [GSC13].

Ein an dieser Stelle erwähnenswertes, für die Refabrikation von Common Rail Injektoren bedeutsames Merkmal dieser Produkte ist es allerdings, dass die *Befehle* für das Öffnen und Schließen der Einspritzdüsen elektronisch erfolgen, die *Betätigung* des zugehörigen Magnetschalters im Injektor ebenfalls noch elektrisch erfolgt, dass jedoch die *Bewegungen* der Düsennadel im Injektor (mehrmaliges Öffnen und Schließen jeweils in Bruchteilen von tausendstel Sekunden) nur durch die immensen hydraulischen Kräfte des unter größten Drücken stehenden Dieselmotorkraftstoffs geschehen kann und geschieht. Dies macht deutlich, welche zentrale Bedeutung für einen Refabrikationserfolg die absolute Sicherstellung der Funktionsfähigkeit und technischen Sauberkeit zugehöriger Hydraulikventile, Kanäle, Zulauf- und Ablaufdrosseln etc. mit ihren mikroskopisch kleinen Dimensionen im Injektor innehat.

### 3.1.6 Common Rail Systeme mit Piezo-Injektoren

Common Rail Systeme mit Piezo-Injektoren entwickelte man in Würdigung der Tatsache, dass Piezo-Elemente noch schneller zu reagieren vermögen als Magnetschalter, gleichwohl aber die dabei zurücklegbaren Schaltwege geringer ausfallen als bei magnetischer Betätigung. Um dies auszugleichen, verfügen die heute im Verkehr befindlichen, also für die Refabrikation anstehenden Piezo-Injektoren über einen sogenannten hydraulischen Koppler („Übersetzer“), welcher den Weg des Piezo-Aktors vergrößert. Um diese hydraulischen Koppler mit einem passenden Hydraulikdruck zu versorgen, benötigen Common Rail Systeme mit Piezo-Injektoren drei (statt nur zwei) Druckbereiche:

- einen Hochdruckbereich (Größenordnung 300 bis 1800 bar) mit Hochdruckpumpe, Hochdruckspeicher, Hochdruckleitungen und je einem Injektor pro Zylinder
- einen Rücklaufdruckbereich (Größenordnung 10 bar) zum Betrieb der zuvor genannten hydraulischen Koppler in den Injektoren; mit zugehörigem Leitungssystem von den Injektoren bis zu einem Druckhalteventil
- einen Vorlaufdruckbereich (Größenordnung 1 bar) mit Kraftstoffförderung inkl. dessen bedarfsweiser Vorwärmung und Filterung und Kraftstoffrückführung von der Hochdruckpumpe, vom Druckregelventil des Common Rail sowie vom Druckhalteventil des Rücklaufdruckbereichs – inkl. dessen Kühlung zurück in den Dieseltank.

Hierbei kann bei entsprechend betriebswarmem Motor durch Schaltung einer Ringleitung auf eine Vorwärmung des aus dem Dieseltank frisch geförderten Kraftstoff sowie Kühlung des in den Dieseltank rücklaufenden Kraftstoff zeitweilig auch verzichtet werden, indem aus dem System zurücklaufender erwärmter Kraftstoff erneut direkt dem Kraftstofffilter und der Hochdruckpumpe zugeführt wird. Abbildung 13 zeigt ein solches Common Rail System mit Piezo-Injektoren schematisch für einen Sechszylinder-V-Motor.

Eine elektronische Steuerung (EDC, vgl. wieder Unterabschnitt 3.1.3), auf deren Darstellung in Abbildung 13 im Interesse der Übersichtlichkeit verzichtet wurde, befiehlt auch bei Common Rail Systemen mit Piezo-Injektoren das Gesamtsystem – auch hier unter Nutzung der zahlreichen Sensoren und Aktoren sowie unter Zugrundelegung eines Kennfeldes wie in Unterabschnitt 3.1.5 erläutert.

Ebenso gelten die dort betonten Gesetzmäßigkeiten, wonach die eigentlichen schnellen Düsennadelbewegungen im Injektor nicht von den (hier: Piezo-) Aktoren, sondern von den hydraulischen Kräften des unter Raildruck stehenden Dieselmotorkraftstoffs herbeigeführt werden, hinsichtlich ihrer Bedeutung für die technische Sauberkeit, Sorgfalt und Präzision einer Refabrikation solcher Piezo-Injektoren hier sinngemäß.

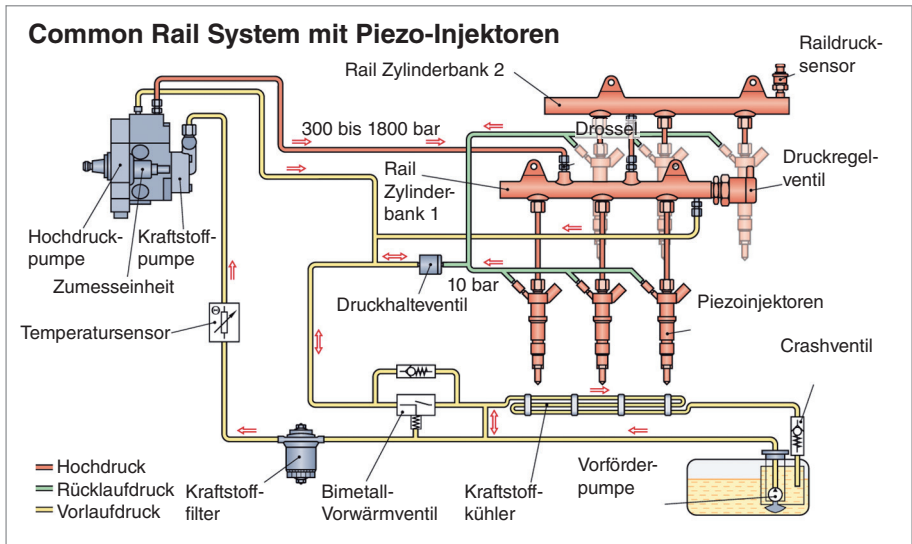


Abbildung 13: Common Rail System mit Piezo-Injektoren

Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

Ergänzend erwähnenswert ist, dass zwischenzeitlich auch rücklauffreie direkt angesteuerte Piezo-Injektoren entwickelt werden, die mit über 80 mm langen Piezoelementen und damit verlängerten Schaltwegen arbeiten, so dass sowohl auf einen hydraulischen Koppler („Übersetzer“) als auch auf den zugehörigen zusätzlichen (dritten) Rücklaufdruckbereich im System verzichtet werden kann. An Stelle des hydraulischen Kopplers verfügen solche Piezo-Injektoren dann über sog. Nadelhubverstärker.

An die Refabrikation stellen Injektoren aus Common Rail Systemen aller beschriebenen Bauarten jedoch vergleichbare, sehr hohe Anforderungen.

### 3.1.7 Baugruppen und Bauteile von Common Rail Injektoren

Magnetventil-Injektoren bestehen prinzipiell aus drei übereinander angeordneten, mittels Überwurfmuttern miteinander definiert verschraubten Hauptbaugruppen:

- Aktormodul mit elektrischem Anschluss und darin enthaltenem Magnetschalter
- Injektorkörper mit Kraftstoffzulauf- und -rücklaufanschlüssen, darin enthaltenem Ventilsteuerraum und Betätigungsstange
- Düseneinheit mit Düsenkörper und darin enthaltener Düsennadel

Die eingangs angesprochenen definierten Verschraubungen dienen

- zwischen Aktormodul und Injektorkörper der Abstandstolerierung zwischen Magnetschalter und Hydraulikventil (Spiel 1  $\mu$ l)
- zwischen Injektorkörper und Einspritzdüse der radialen Ausrichtung der sternförmigen Einspritzstrahlen im Brennraum (sichergestellt durch zwei Fixierstifte)

Zahlreiche funktionsnotwendige Kleinteile (neben den o. g. Fixierstiften z. B. Dichtungen, Scheiben, Federn, Ventilkugeln) bleiben hier unerwähnt. Sie ergeben sich aus den folgenden Abbildungen dieses Kapitels sowie teils aus den Ausführungen zur Refabrikation von Common Rail Injektoren in den Kapiteln 6 bis 8.

Piezo-Injektoren sind prinzipiell ähnlich, aber meist aus nur zwei Hauptbaugruppen aufgebaut, denn sie unterscheiden sich schon geometrisch dahingehend, dass das Aktormodul (aufgrund einer erforderlichen Mindestlänge des Piezo-Elements, um einen ausreichenden Schaltweg zu erzeugen) deutlich länger ausgeführt werden muss. Daher ist das Aktormodul nicht aufgeschraubt, sondern immer Bestandteil des Injektorkörpers, an dem Kraftstoffzulauf und -rücklauf bereits oben angeschlossen sind. Dagegen sind hydraulische Koppler (wenn vorhanden) sowie Ventilsteuerraum im Gegensatz zu Magnetventil-Injektoren vergleichsweise weit unten im Piezo-Injektor nahe der Düsennadel angeordnet.

Die Technologieentwicklung zur Refabrikation von Common Rail Injektoren wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel von Magnetventil-Injektoren behandelt, die Arbeitsergebnisse gelten jedoch weitgehend auch für Piezo-Injektoren sinngemäß.

Abbildung 14 zeigt schematisch den Aufbau je eines Injektors mit Magnetventil und mit Piezoelement mit den drei Baugruppen Aktormodul, Injektorkörper und Düseneinheit.

Bezüglich der detaillierten Funktionsweise beider Injektortypen kann an dieser Stelle gleichfalls auf die ausführliche einschlägige Literatur [REI10], [GSC13] verwiesen werden. Wo erforderlich, da refabrikationsrelevant, wird auf diese allerdings in den zugehörigen Kapiteln 6 bis 8 eingegangen werden.

## Injektoren-Bauarten und -Baugruppen

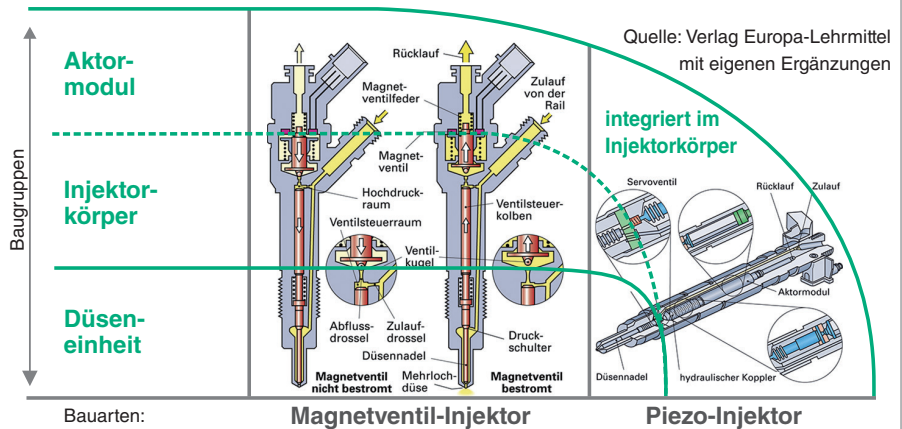


Abbildung 14: Injektoren-Bauarten und -Baugruppen

Illustrationsquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel (Injektoren)

### 3.1.8 Pumpe-Düse-Elemente (Unit Injectors)

Pumpe-Düse-Elemente, für die auch die angloamerikanische Bezeichnung/Abkürzung Unit Injector System/UIS gebräuchlich ist, sind Injektoren mit integrierter Hochdruckpumpenfunktion. Sie werden durch die Motornockenwelle, welche zusätzlich zu den Ventilenocken auch pro Zylinder noch über einen Einspritznocken verfügt, betätigt. Pumpe-Düse-Elemente beziehen also den hohen Einspritzdruck nicht über Druckleitungen aus einem Common Rail, welches von einer Hochdruckpumpe gespeist wird, sondern erzeugen diesen bei jedem Arbeitstakt selbst, indem der Körper des Unit Injectors als Pumpenzylinder fungiert und ein vom Einspritznocken abwärts gedrückter Pumpenkolben den Einspritzdruck erzeugt. Weitere Funktionen des Unit Injectors, wie Magnetventil-Initiierung der Einspritzvorgänge, Kraftstoffzulauf und -rücklauf sowie hydraulisch bewirkte Düsenadelbewegungen sind mit denen in Magnetventil-Injektoren und Piezo-Injektoren vergleichbar oder zumindest verwandt.

Abbildung 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Abläufe in Pumpe-Düse-Elementen beim Befüllen und den Einspritzungen. Für weitere Funktionsdetails kann auch hier auf die ausführliche Literatur verwiesen werden [REI10], [GSC13].

Pumpe-Düse-Elemente sind seitens der Hersteller und Inhaber zugehöriger Patente noch nicht zur Refabrikation freigegeben. Sie werden im Unternehmen des Verfassers deshalb derzeit nicht aufgearbeitet - wohl aber sowohl Hochdruckpumpen als auch Magnetventil- und Piezo-Injektoren, so dass die in der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse durch Analogieschlüsse auch für die Refabrikation von Pumpe-Düse-Elementen nutzbar sind.

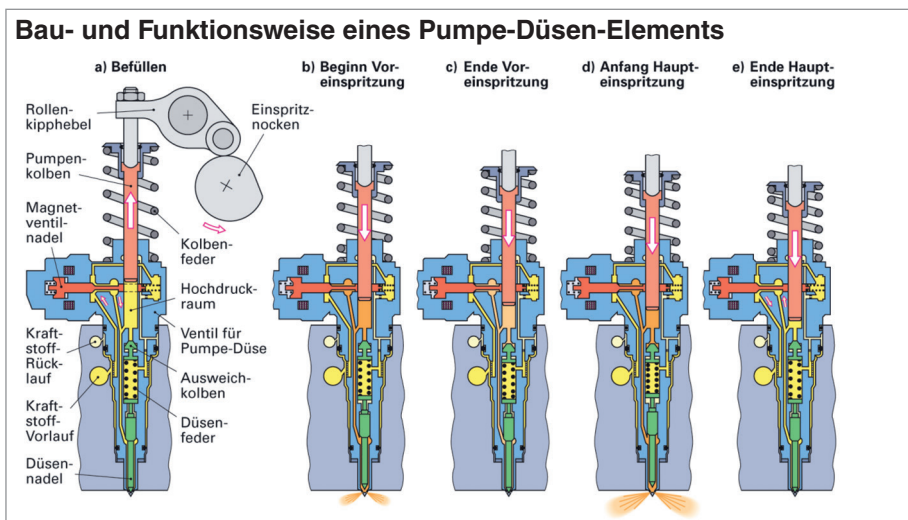


Abbildung 15: Bau- und Funktionsweise eines Pumpe-Düsen-Elements

Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel



## 3.2 Refabrikation von Kfz-Ersatzteilen

### 3.2.1 Produkte und Märkte

Die wichtigsten Arbeiten, die sich der Refabrikation widmeten (seinerzeit noch unter den nachfolgend jeweils in Klammern genannten Begrifflichkeiten) und diese ins Bewusstsein ingenieurwissenschaftlicher Forschungsanstrengungen rückten, haben zu Beginn der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts in den USA Lund und Bollinger („Remanufacturing“) [LUN84]; [BOL81], in Europa Kaminsky („Grunderneuerung“) [KAM82], sowie Warnecke et al („Produktrecycling“) [WAR86] vorgelegt.

Mit Stolz registrierten seinerzeit die in Deutschland tätigen Zylinderschleifereien und Motoreninstandsetzungsbetriebe, zu denen auch das mittlerweile vom Verfasser geleitete Unternehmen schon in jenen Jahren zählte, dass ihr Tun eine Industrie repräsentierte, der in den einschlägigen Fachveröffentlichungen die Attribute „Hidden Champions“ und „Hidden Giant“ [HAU03] zuerkannt wurden.

Hinzu kam, dass sich die Weltwirtschaft noch in der Erholungsphase von der ersten Ölversorgungskrise in den siebziger Jahren sowie der zeitgleich schmerzlich bewusst gewordenen ersten Warnungen des Club of Rome vor allgemeiner Ressourcenverknappung befand, so dass der Refabrikationsindustrie auch Anerkennung für Ihre signifikanten Beiträge zum Recycling zuteil wurde.

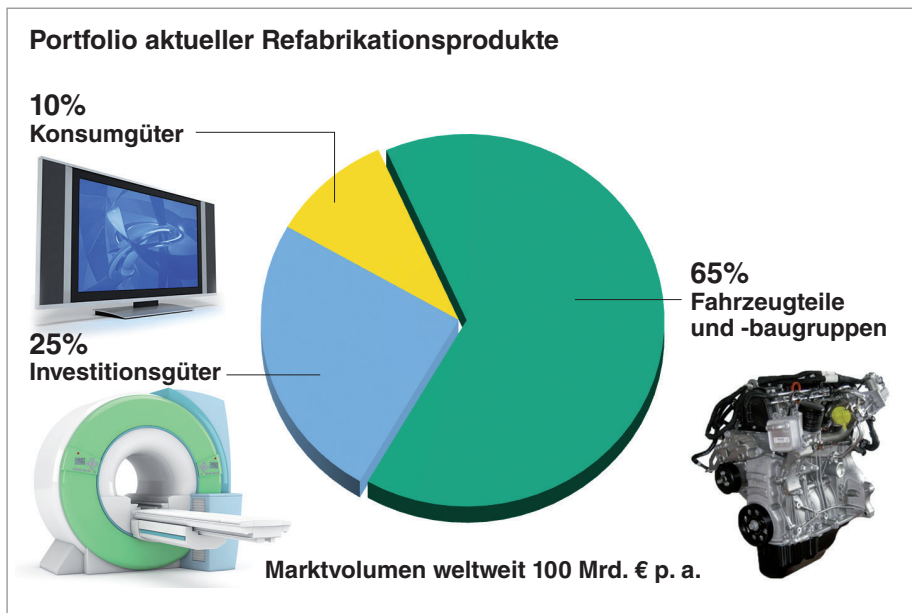


Abbildung 16: Portfolio aktueller Refabrikationsprodukte,  
Illustrationsquellen: Fotolia und Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Produkte)

Gemessen an dieser neuen Aufmerksamkeit für die Refabrikation blieb allerdings die Zahl zugehöriger Fachveröffentlichungen bis zum heutigen Tage jedoch eher gering: sie zählt allenfalls in Hunderten, während wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Produktionstechnik in Hunderttausenden zählen.

Folgt man den Veröffentlichungen zum Thema bis in die aktuelle Zeitrechnung [STE12], so stellen sich Refabrikationsprodukte und -märkte so dar, dass Kfz-Teile ca. zwei Drittel des gesamten Spektrums repräsentieren, wobei das verbliebene Drittel hauptsächlich von Investitionsgütern und zu einem etwas zehnpromzentigen Teil von Konsumgütern bestritten wird, Abbildung 16.

Abbildung 16 verdeutlicht zudem, dass das jährliche weltweite Marktvolumen für Refabrikationsprodukte inzwischen die 100-Milliarden-Euro-Marke überschritten hat [GIA10], [WIL12]. Da die Refabrikationsindustrie sehr weit verzweigt und größtenteils mittelständisch strukturiert ist, dringt ihre Bedeutung jedoch nicht so ins allgemeine Bewusstsein wie beispielsweise die Einzelmarke eines großen internationalen Konzerns mit vergleichbarem Marktvolumen, die dann nahezu jedermann kennt.

Bei näherer Betrachtung des Produktportfolios von Kfz-Ersatzteilen aus der Refabrikation ist zunächst generell zu vermerken, dass sich die Produktspektren - in durchaus nachvollziehbarer Weise - mit einem etwa fünfjährigen zeitlichen Versatz analog zu den Trends bei den automobilen Motoren-/Antriebs- und Fahrwerkstechnologien entwickeln. Eine Reihe von Autoren führen zugehörig aus, dass rein mechanische oder elektrische Fahrzeugkomponenten zunehmend um elektronische Bestandteile erweitert werden, bzw. dass auch neue mechatronische Komponenten Eingang in die Märkte gefunden haben, für die im klassischen Automobilbau bisher keine vergleichbaren Pendants existierten [FRE07]

Als erster hat jedoch Weiland [WEI08] darauf hingewiesen, dass die Zukunft der Refabrikationsindustrie bzw. die Ansiedlung der interessantesten Refabrikationsprodukte im Portfolio dort zu erwarten ist, wo die über Jahrzehnte durchaus profitablen Pfade der Refabrikation klassischer Motor- und Fahrwerkskomponenten verlassen werden und neue Felder erschlossen werden, Abbildung 17.

Weiland bezieht sich hierbei insbesondere auf mechatronische Bremsen- und Lenkungs-komponenten sowie auf Komponenten des zukünftig mehr oder weniger zu elektrifizierenden Antriebsstrangs. Auf die Potenziale der Refabrikation von Common Rail Einspritzsystemen findet sich dort kein Hinweis - auch für deren neue Herausforderungen erfolgt kein Fingerzeig wie etwa für die anderweitig angesprochenen zukünftigen mechatronischen Refabrikationsprodukte.

### Marktportfolio-Entwicklung für Kfz-Refabrikationsprodukte

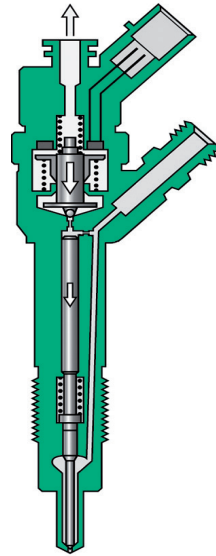
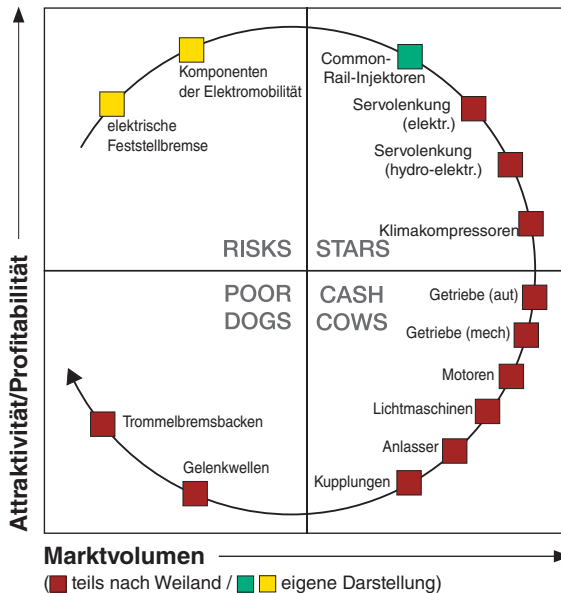


Abbildung 17: Marktportfolio-Entwicklung für Kfz-Refabrikationsprodukte

Illustrationsquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel (Injektor)

### 3.2.2 Technologien

Eine erste wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den fünf Prozessschritten der Refabrikation: *Demontage, Reinigung, Prüfung, Aufarbeitung, Wiedermontage* hat vor einem Vierteljahrhundert – als Reaktion auf die seinerzeit der Refabrikation zuteil gewordenen Aufmerksamkeit – Steinhilper in [STE88] vorgelegt. Er behandelt für diese Prozessschritte jeweils die die Refabrikationsindustrie fordernden Aufgaben, technologischen Schwerpunkte, Fertigungseinrichtungen, Materialflusseinrichtungen, Organisationsprinzipien und Besonderheiten. Das von ihm bearbeitete Produktspektrum überstreicht alle Sektoren vom Automobilbau über die Investitions- bis zur Konsumgüterindustrie. Common Rail Injektoren konnten seinerzeit – zehn Jahre vor dem Serienanlauf der ersten Common Rail Einspritzsysteme überhaupt - selbsterklärend natürlich noch nicht angesprochen werden.

Steinhilper und auch Sundin [SUN04] führen darüber hinaus auch aus, dass die Refabrikation in besonderem Maße durch konstruktive Bemühungen um eine recyclinggerechte Produktgestaltung begünstigt wird - eine Disziplin, zu der ab 1984 dann auch die

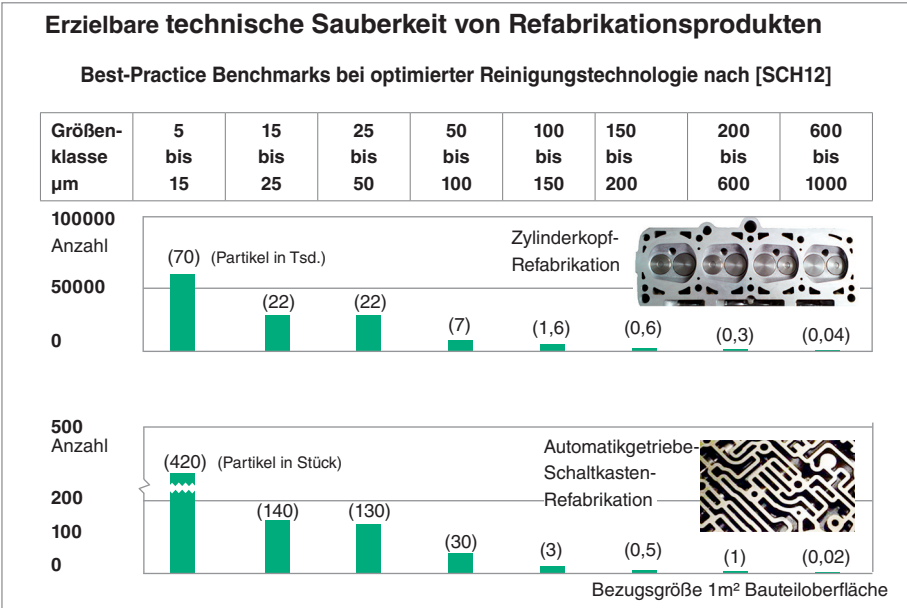


Abbildung 18: Erzielbare technische Sauberkeit von Refabrikationsprodukten,  
Illustrationsquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Produkte)

erste einschlägige VDI-Richtlinie [VDI84] erschien. Recyclinggerechte Produktgestaltung leidet jedoch im allgemeinen bis heute unter einer Vernachlässigung gegenüber anderen konstruktionssseitigen Priorisierungen – lediglich ausgewählte Kfz-Komponenten, ohne produkt- oder herstellerspezifische Schwerpunkte, bilden hier wenige positive Ausnahmen. Dieseleinspritzsysteme zählen aufgrund ihres nicht wegzudiskutierenden gelegentlichen Instandsetzungsbedarfs hier erfreulicherweise dazu.

Zwei besonders herausfordernde Prozessschritte in der Technologiefolge der industriellen Refabrikation, für die sich keine Analogien aus der Neuproduktion heranziehen lassen, sind die Reinigung sowie die Prüfung der Bauteile auf Wiederverwendbarkeit und ggf. Aufarbeitbarkeit.

Mit Reinigungstechnologien für die Refabrikation in einem interdisziplinären chemisch/physikalisch/ingenieurwissenschaftlichem Ansatz beschäftigt sich Wrobel in [WRO07] am Beispiel der Reinigung von Dieselpartikelfiltern für deren Refabrikation. Für andere Kfz-Ersatzteile im Antriebsstrang, namentlich die reinigungstechnisch anspruchsvollen Komponenten Zylinderkopf und Automatikgetriebe, entwickelt Schweinstig in [SCH12] Algorithmen zur Anforderungsermittlung, Herbeiführung sowie Feststellung der technischen Sauberkeit von Refabrikationsprodukten. Er führt auch neu die von ihm so definierten RCCC's (Remanufacturing Component Cleanliness Classes) ein, deren

## Prozessschritte der Refabrikation

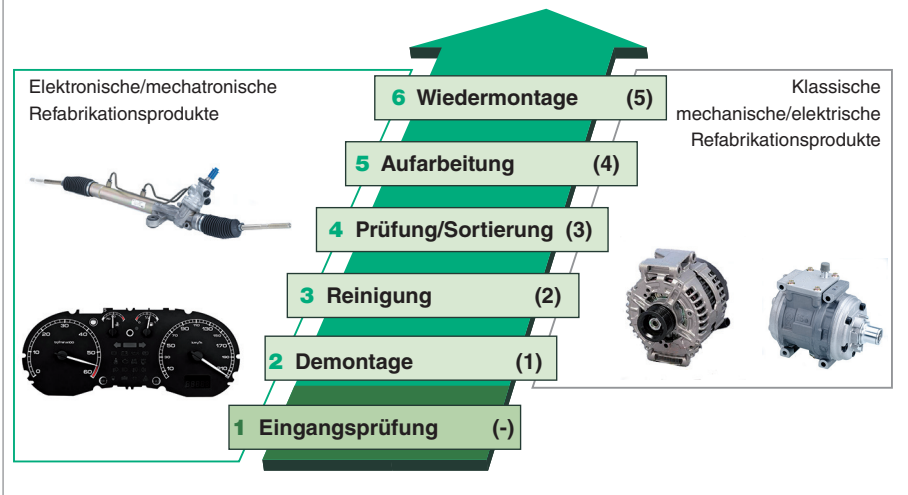


Abbildung 19: Prozessschritte der Refabrikation,  
Illustrationsquellen: Fotolia und Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Produkte)

Erzielbarkeit in den von ihm ermittelten höchsten Sauberkeitsstufen (Abbildung 18) gleichwohl noch merklich unterhalb der später noch zu definierenden Reinheitsanforderungen an Common Rail Injektoren angesiedelt ist.

Neue Ansätze für Prüf- und Diagnosetechnologien zur Refabrikation von mechatronischen Systemen aus Fahrzeugen publiziert Freiberger in [FRE07] und setzt sich dort nicht nur intensiv mit Prüf- und Diagnosemöglichkeiten auseinander, sondern behandelt auch die wichtige Frage der Spezifikationsermittlung für die Refabrikation von Kfz-Ersatzteilen durch herstellerunabhängig im Markt tätige Refabrikationsunternehmen.

Freibergers Verdienst ist es auch, erstmals auf die Notwendigkeit eines weiteren, vorgelagerten Prozessschrittes bei der Refabrikation von mechatronischen Produkten hingewiesen zu haben: eine *Eingangsprüfung von der Demontage*, die die fünf klassischen Prozessschritte der Refabrikation für mechatronische Produkte sehr wesentlich und wertvoll ergänzt, Abbildung 19.

Alle diese Themen sind auch von höchster Relevanz für die Refabrikation von Common Rail Injektoren, wobei sich die Ausführungen in [FRE07] jedoch primär auf elektronische Luftmassensensoren sowie elektrohydraulische Servolenkungspumpen, also Refabrikationsprodukte mit deutlich anderer Charakteristik, beziehen.

### 3.2.3 Optimierungsmethoden

Wichtige Beiträge zur Optimierung des Fertigungsflusses in der Refabrikation – unter Nutzung von Methodenwissen aus der Neuproduktion, aber auch unter Einbezug refabrikationsspezifischer Besonderheiten – hat Dunkel geliefert [DUN07]. Er diskutierte

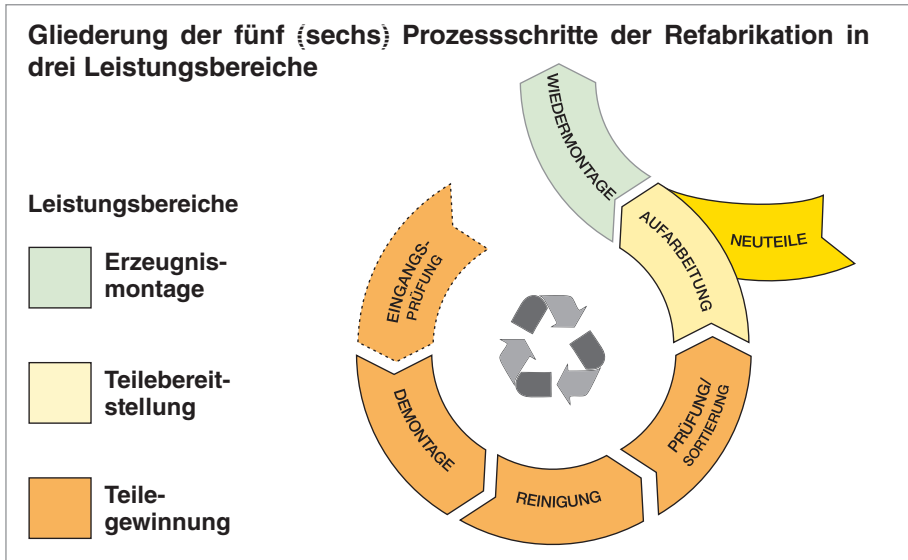


Abbildung 20: Gliederung der fünf (sechs) Prozessschritte der Refabrikation in drei Leistungsbereiche

und dokumentierte die gezielte Anwendung von vierzehn Regelwerken des Wertstromdesign, erweiterte diese um eigens entwickelte refabrikationsspezifische Regeln und Maßnahmen und verifizierte seine Thesen durch deren Anwendung in europäischen Refabrikationsunternehmen für Kfz-Kupplungen, Turbolader sowie Anlasser und Lichtmaschinen.

Haumann [HAU11] erweiterte diese Ansätze um sein Konzept „ATO“ (Assemble to Order) und entkoppelte damit die unterschiedlichen, teils gegenläufigen Optimierungsansätze in der Demontage, Reinigung und Prüfung einerseits sowie in der Aufarbeitung und Wiedermontage andererseits – verifiziert in einem führenden europäischen Refabrikationsunternehmen für Automatikgetriebe.

Mit dieser Entkopplung griff Haumann auch einen Leitgedanken wieder auf, für den schon in [STE86] und [STE88] viel früher bereits plädiert worden war: eine Trennung der Refabrikation in die drei Leistungsbereiche *Teilegewinnung* (Demontage, Reinigung und Prüfung), *Teilebereitstellung* (Aufarbeitung und Neuteilezuschussbeschaffung) und *Erzeugnismontage*, Abbildung 20.

Dieser Ansatz ist dann besonders wirkungsvoll, wenn stark unterschiedliche Optimierungsansätze in den genannten Leistungsbereichen jeweils gezielt angegangen werden sollen. Er wird auch in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen werden, wo dies sinnvoll ist bzw. zur Lösung beiträgt. Mit Common Rail Injektoren hat sich gleichwohl keiner der Autoren der in diesem Abschnitt gewürdigten Arbeiten bislang befasset.

### **3.2.4 Eignungsbeurteilung von Produkten zur Refabrikation**

Ein erstes Methodenraster zur Evaluierung der Eignung von Produkten zur Refabrikation wurde als Ergebnis einer vom Rationalisierungskuratorium der deutschen Wirtschaft RKW in Auftrag gegebenen Studie im Jahr 1993 in [STE93] vorgestellt. Bei diesem Evaluierungsverfahren passieren die zu beurteilenden Produkte nacheinander verschiedene Filter, in denen technische Kriterien, Mengenkriterien, Wertkriterien, Zeitkriterien und weitere Kriterien abgefragt, beziffert und die zu beurteilenden Produkte dann in zugehörigen Portfolios eingeordnet werden, um zumindest tendenzielle Aussagen über deren Eignung (bzw. aus unternehmerischer Sicht über die Chancen einer zugehörigen Geschäftsfeldentwicklung) zu erlangen. Dieses Raster wurde dann in [STE99] und [BUL09] noch um Aspekte der Einflüsse seitens anderer Marktteilnehmer sowie um logistische Fragestellungen ergänzt. Es erfuhr nach Informationen des Verfassers dann auch noch durch Consultingfirmen unternehmensspezifische Ergänzungen und fand in den neunziger Jahren auch verschiedentlich Anwendung in sehr großen Unternehmen, die mit seiner Hilfe ein Screening der eigenen sehr vielfältigen Produktprogramme im Hinblick auf die Refabrikationspotentiale durchführten. Eine Anwendung in mittelständischen Unternehmen, insbesondere auch für Common Rail Injektoren, ist jedoch bislang nicht bekanntgeworden und soll daher in dieser Arbeit – ergänzt um eigene Kriterien – angegangen werden.

## **3.3 Kfz-Instandhaltung und Kfz-Service-Engineering**

Kraftfahrzeuge können beim Stand der Technik nicht für eine instandhaltungsfreie Funktion von der ersten Inbetriebnahme bis zur Außerbetriebsetzung nach durchschnittlich 12 Jahren Fahrzeuglebensdauer ausgelegt werden, wie dies z. B. bei anderen anspruchsvollen Konsum- und Investitionsgütern (große Flachbildschirm-Fernsehergeräte, Premium-Hausgeräte, Rolltreppen, Aufzüge) bereits vollständig oder zumindest weitgehend gelungen ist.

Entsprechend wichtig ist daher eine gut positionierte und funktionierende flächendeckende Infrastruktur zur laufenden Instandhaltung von Kraftfahrzeugen; also nach der Norm [DIN31] zu deren Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Nicht minder wichtig

ist eine laufende Entwicklung neuer Serviceleistungen dieses Wirtschaftszweigs, für die von wissenschaftlicher Seite bereits vor der Jahrtausendwende [BUL03] der Begriff Service Engineering geprägt wurde. Dabei spielt auch die laufende intensive Weiterbildung der Servicemitarbeiter bezüglich des technischen Fortschritts im Kraftfahrzeug eine zentrale Rolle, wozu auch Common Rail Einspritzsysteme wichtige Beiträge leisteten und noch leisten.

### 3.3.1 Paradigmenwechsel

Im Jahre 2003 vollzog der Zentralverband des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes (ZDK) eine Umbenennung seines populärsten und traditionsreichen Ausbildungsberufs Kfz-Mechaniker in Kfz-Mechatroniker und trug damit einem Paradigmenwechsel Rechnung, der nicht nur unter den Motorhauben, sondern im gesamten Fahrzeug stattgefunden hat und sich noch weiter intensiviert; Die Elektronik bzw. Mechatronik ist zur dominanten (und werthaltigsten) Komponente im System Automobil avanciert. Dementsprechend bewegt der rechte Fuß des Fahrers mit dem „Gaspedal“ keinen Bowdenzug mehr, welcher die Drosselklappe öffnet, sondern gibt ein mehr oder minder starkes elektronisches Signal, das bei den Steuergeräten des Antriebsstrangs ein zugehöriges Drehmoment anfordert. Auch beim beherzten Tritt auf das Bremspedal oder einer heftigen Lenkbewegung in Gefahrensituationen kommen ihm elektronische Assistenzsysteme mehr und mehr zuvor. Dabei sollten die Hände des Fahrers zwar noch auf dem Lenkrad ruhen, doch neueste Premiumautomobile korrigieren den Kurs

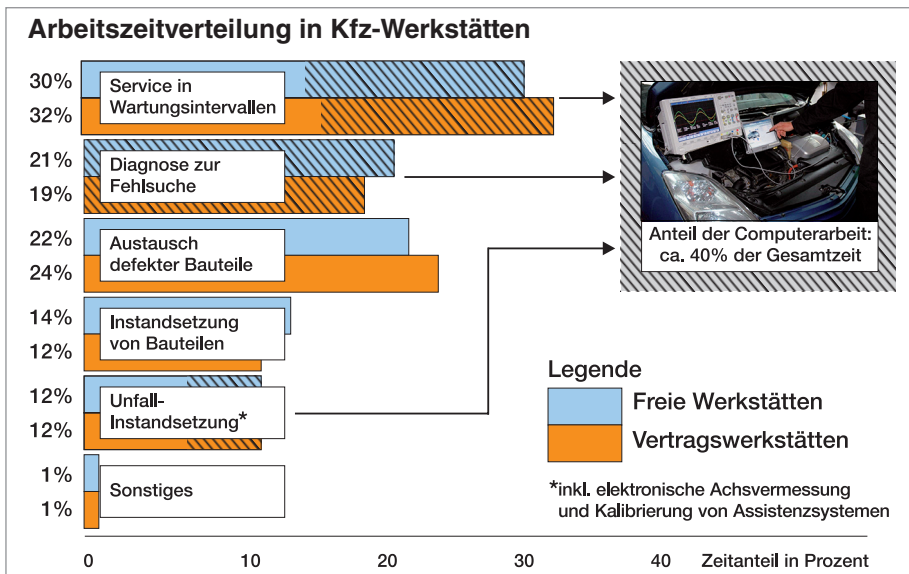


Abbildung 21: Arbeitszeitverteilung in Kfz-Werkstätten



nach einer Seitenwind-Bö auf Wunsch auch elektronisch selbsttätig.

Dies bringt es mit sich, das auch in der Kfz-Werkstatt Fähigkeiten im Umgang mit elektronischen Diagnosegeräten in den Vordergrund getreten sind gegenüber handwerklichen Fähigkeiten und Fertigkeiten. Nach ZDK-Angaben arbeitet laut [RIE12] sowie nach [AUT13] ein Kfz-Mechatroniker von heute bereits mehr als die Hälfte seiner Zeit am Computer, Abbildung 21.

An die Stelle des „Reparierens“ durch Instandsetzen oder Ersetzen einzelner (mechanischer/elektrischer) Teile ist vielfach der Austausch ganzer (elektronischer/mechatronischer) Baugruppen auf Anweisung eines Diagnostesters getreten.

Das Kraftfahrzeug-Handwerk arbeitet, auch mit wissenschaftlicher Unterstützung [AUT13], intensiv daran, den Herausforderungen dieses Paradigmenwechsel auch in Zukunft noch gewachsen zu sein.

Als besondere Problemfälle werden in zugehörigen Untersuchungen [AUT13] seitens der Kfz-Werkstätten sporadisch auftretende Fehler genannt. Hiervon sind auch Einspritzsysteme und mithin auch Common Rail Injektoren betroffen.

Wenn der Fehler beim Werkstattaufenthalt nicht feststellbar ist - und auch der Fehlerpeicher des Fahrzeugs keine dem sporadisch Fehler eindeutig zuordnenbare Informationen ausgibt, bleibt oftmals nur noch der Austausch von Komponenten „auf Verdacht“ – z. B. von Common Rail Injektoren, deren Risiko des Versottens und Verkokens im Stopp-and-Go- beziehungsweise Stadtverkehr dann z. B. als Ursache sporadisch aufgetretener Fehler angenommen wird. Unmittelbare Informationen zum Zustand von Common Rail Injektoren können bisher sowohl OBD (OnBoardDiagnostics)-Systeme im Fahrzeug als auch OFB (OffBoardDiagnostics)-Systeme in der Kfz-Werkstatt nicht ausgeben. Diese lassen sich erst bei deren Refabrikation detaillierter gewinnen. Nicht selten zeigt sich hierbei auch, dass intakte Common Rail Injektoren (wie zahlreiche andere Refabrikationsprodukte auch) in der Kfz-Werkstatt „auf Verdacht“ ausgetauscht worden sind.

### **3.3.2 Wirtschaftliche Bedeutung**

Das Kraftfahrzeug-Handwerk leistet nach aktuellen Angaben seiner Innungen bzw. seiner Kammern und Verbände [ZDK13] einen bedeutenden Beitrag zur Beschäftigung in Deutschland, der an die Beschäftigtenzahlen der im öffentlichen Bewusstsein meist stärker präsenten Automobilindustrie heranreicht, oder diese übersteigt. In diesem Zusammenhang wird auch Anlass zur Sorge geäußert, wenn die Kfz-Instandhaltung in Zukunft noch stärker vom Austausch defekter Baugruppen gegen Neuteile (die im Falle von importierten Injektoren-Fabrikaten an ausländischen Standorten gefertigt werden) gekennzeichnet sein sollte und somit eigene Wertschöpfung der Kfz-Instandhaltung (und damit Beschäftigung im Inland) zurückgeht. Abbildung 22 zeigt zugehörig

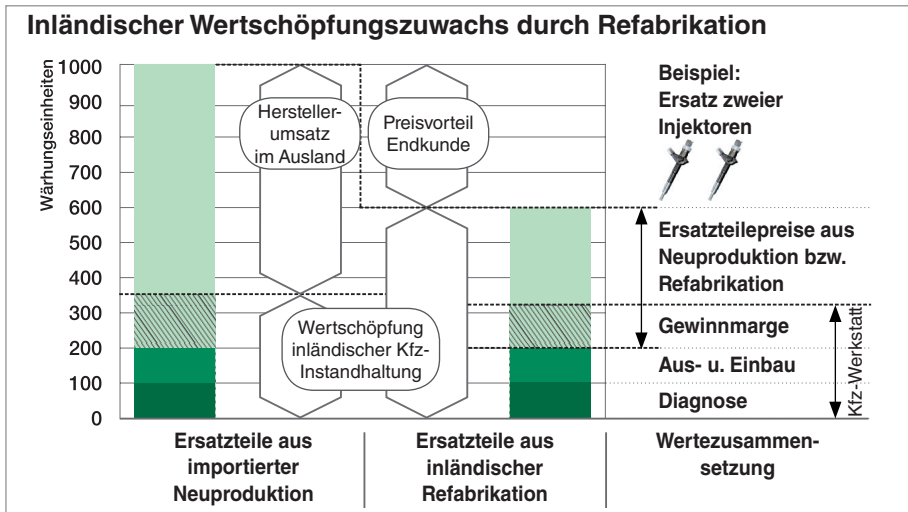


Abbildung 22: Inländischer Wertschöpfungszuwachs durch Refabrikation,  
Illustrationsquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Injektor)

sowohl den durch inländische Refabrikation erzielbaren Wertschöpfungszuwachs für das Kraftfahrzeug-Handwerk als auch den dadurch entstehenden Preisvorteil für den Endkunden.

Die sehr werthaltigen Common Rail Injektoren bieten geradezu ein Musterbeispiel für Optionen, einem solchen nicht wünschenswerten Rückgang an eigener Wertschöpfung der Kfz-Instandhaltung im Inland gegenzusteuern, in dem sie hierzulande mit höchster Präzision ihre Refabrikation durchlaufen, anstatt im Ausland neu nachproduziert zu werden.

### 3.3.3 In-situ-Reinigung von Common Rail Injektoren

Ein geradezu klassisches Phänomen im Fahrbetrieb, sowohl von Benzin- als auch von Dieselmotoren, ist das Verrußen der Brennräume bei hauptsächlich Kurzstrecken- und Stadtverkehrsbetrieb, mit vielen Kaltstarts und häufig nicht vollständigem Warmwerden des Motors. Es konnte dank präziserer Kraftstoffumessung durch elektronisches Motormanagement in sämtlichen Betriebszuständen zwar zurückgedrängt, gleichwohl aber nicht vollständig ausgeschaltet werden. Ist ein Motor davon betroffen, kommt es zu unrundem Leerlauf und Leistungsverlusten.

Geläufige Praxis ist es daher, bei entsprechend verrußten Brennräumen und deren „Peripherie“, also nicht nur Ein- und Auslassventile und -kanäle, sondern auch die Dü-

### Düsenkörper-Erscheinungsbild bei Motorfehlern

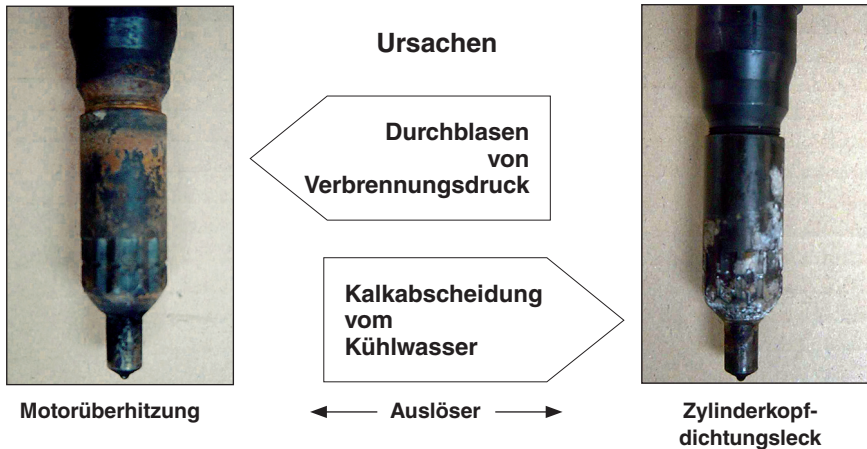


Abbildung 23: Düsenkörper-Erscheinungsbild bei Motorfehlern,

Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

senenden von Common Rail Injektoren, die in den Brennraum ragen, nach Möglichkeit wieder zu entrußen. Eine weit verbreitete Methode ist es, den Motor mithilfe chemischer Zusätze im Kraftstoff zu reinigen bzw. das System „freizubrennen“:

Common Rail Injektoren, die mit geringerem Arbeitsaufwand (aber größerer Sorgfalt) aus dem Motor ausgebaut werden können als etwa Ventile, werden in der Kfz-Werkstatt zuweilen auch entnommen und in einem Ultraschallbad gereinigt.

Selbst Injektoren mit äußerlich schwer in Mitteleidenschaft gezogenen Düseneinheiten, für die Abbildung 23 zwei Beispiele und die Ursachen bzw. Auslöser zeigt, können (durch Reinigung und Beseitigung der Auslöser) zuweilen durchaus auch schon in der Kfz-Werkstatt nochmals „gerettet“ werden.

Belegbare Statistiken zur Erfolgsquote dieser Prozeduren sind jedoch nicht verfügbar.

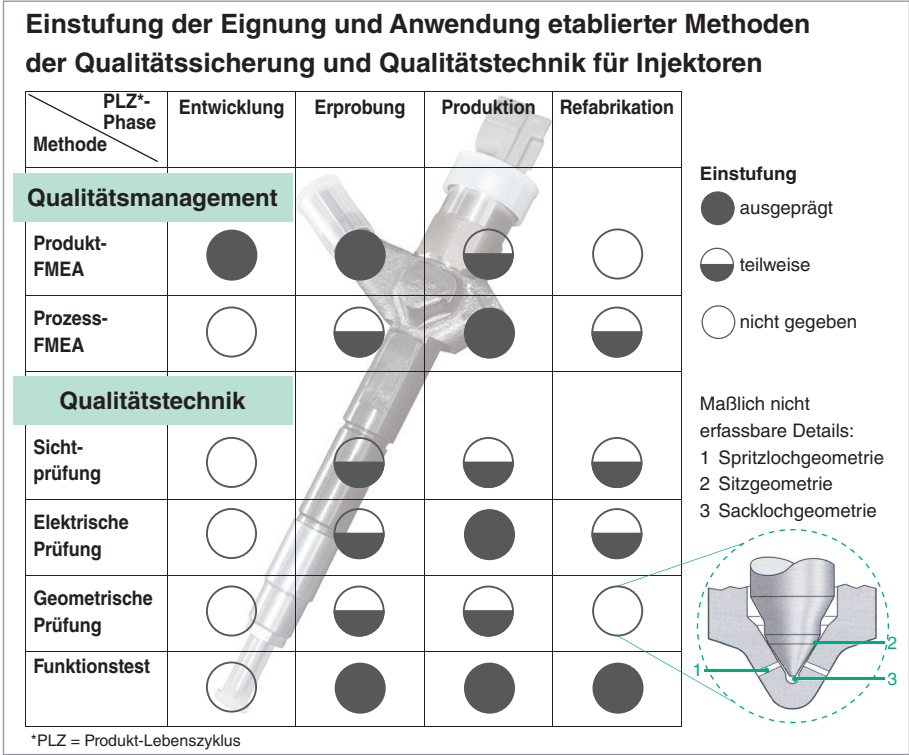
Bleibt ein Erfolg in der Kfz-Werkstatt aus, eignen sich solchermaßen geschädigte Injektoren, wie Abbildung 23 sie zeigt, gleichwohl noch besonders zur Refabrikation: ihre Aktormodule und Injektorkörper sind ohnehin die werthaltigeren Baugruppen und in aller Regel für eine Wiederverwendung geeignet.

Ein in jüngerer Zeit am Markt erschienenenes In-situ-Reinigungskonzept für Common Rail Injektoren, das die Möglichkeiten in der Kfz-Werkstatt erweitert, Injektoren nicht ersetzen zu müssen, wird in Unterabschnitt 4.2.3 angesprochen bzw. empfohlen werden.

### 3.4 Qualitätssicherung in der Produktion und Refabrikation

Ingenieurwissenschaftliche Anstrengungen zur Verbesserung der Qualitätstechnik und des Qualitätsmanagements in der Produktion haben im Verlaufe nur einer Ingenieursgeneration in der jüngeren Vergangenheit (d. h. auch seit den vergleichbar kurz oder lang zurückliegenden Jahren des Ingenieursstudiums des Verfasser dieser Arbeit) zu bemerkenswerten Fortschritten geführt:

War in jenen Zeiten das geflügelte Wort von den sogenannten „Montags-Autos“ (d. h. von überdurchschnittlich fehlerbehafteten Fahrzeugen aufgrund unaufmerksamer/unausgeschlafener aus dem Wochenende zurückgekehrter Werker) noch durchaus ein Stück industrielle Realität – und das Credo von der „Null-Fehler-Produktion“ in dieser Branche auch eher Utopie, so ist letzteres zwischenzeitlich zumindest deutlich näher gerückt.



\*PLZ = Produkt-Lebenszyklus

Abbildung 24: Einstufung der Eignung und Anwendung etablierter Methoden der Qualitätssicherung und Qualitätstechnik für Injektoren, Illustrationsquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Injektor) und Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel (Düsenteil)

Diese erzielten Fortschritte sind das Verdienst ausgesprochen intensiver weltweiter Anstrengungen, um im zeitgleich sich entwickelnden harten internationalen Wettbewerb um Qualitätsführerschaft zu bestehen. Das zugehörig aufgebaute umfangreiche Know-how hat seinen Niederschlag zwischenzeitlich einerseits in der industriellen Praxis, andererseits auch in der Literatur bzw. in teils mehr als tausendseitigen einschlägigen Grundlagenwerken [GEI07], [PFE14] gefunden.

Im Kontext der vorliegenden Arbeit seien hieraus lediglich die beiden folgenden Grundgedanken extrahiert:

- Als Werkzeug mit sowohl breiter Anwendbarkeit als auch großem Nutzen für die Steigerung der Qualität wird die Methode der FMEA (Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse) [DIN60] von zahlreichen Autoren gewürdigt;
  - unterteilt in Produkt-FMEA
  - und Prozess FMEA,wobei deren Fokus in beiden Kategorien konsequent die Fehlerursachenbekämpfung statt Fehlersymptombekämpfung ist.
- Es herrscht genereller Konsens, dass Qualität nicht “herbeigeprüft“, sondern von vornherein produziert werden sollte, wofür besonderes Augenmerk auf strenge Wareneingangsprüfung und beherrschte Fertigungsprozesse gerichtet wird. In der industriellen Praxis findet man folglich meist einen kombinierten Ansatz aus möglichst weit getriebener Prozesssicherheit, ergänzt um eine zusätzliche Prüfung kritischer Produktparameter.

Projiziert man den hier aufgebauten Wissensschatz auf die Gegebenheiten der Refabrikation, so wird schnell zweierlei deutlich:

- Bezüglich der FMEA: der Fehlervermeidungsansatz der FMEA kann hier nicht greifen, da ein Großteil der Fehler nun einmal systembedingt in den zur Refabrikation zurücklaufenden Produkten vorhanden ist [DUN08] - ohne solche vorhandenen Fehler wäre der Refabrikation ja geradezu die Geschäftsgrundlage entzogen.

Lediglich der prozessseitige Ansatz der FMEA zur Senkung des Fehlerrisikos im Verlaufe der Refabrikation ist von gewisser Relevanz, wobei die Prozess-FMEA hier nur Beiträge zur Beseitigung von während der Refabrikation entstandenem Fehlerursachen (z. B. unsachgemäße Demontage oder Kontamination durch Fremdkörper) liefern kann; außerdem gibt sie Anregungen bei der Differenzierung zwischen Fehlerauftreten und Fehlerentdeckung [DUN08].

Die meisten Fehler wohnen den zur Refabrikation angelieferten Produkten inne und sind durch Refabrikations-FMEA nicht bekämpfbar.

- Bezüglich der Forderung „Qualität produzieren statt herbeiprüfen“: Die sehr engen Toleranzvorgaben und mikroskopisch kleinen Dimensionen wesentlicher konstruktiver Elemente in Common Rail Injektoren werden selbst bei deren Neufertigung – streng produktionstechnisch betrachtet – noch nicht hinreichend beherrscht. So wird beispielsweise das vorgegebene Führungsspiel der Düsen-nadel im Düsenkörper von nur  $2\text{ }\mu\text{m}$  „herbeigeprüft“, indem jeweils zueinander passende Paarungen Nadel/Körper durch deren jeweilige Messung ermittelt und dann in auswählender Montage vereinigt werden.

Mehr wird somit auch eine im Idealfall zur höchsten Ausbaustufe entwickelte Refabrikationstechnologie nicht leisten können.

Bestimmte geometrische Eigenschaften, z. B. die innere Beschaffenheit der Einspritzdüsenlöcher, wie Kantenverrundungen sowie Durchmesseränderungen und Oberflächenbeschaffenheit im Bohrungsverlauf, durch die im Betrieb des Injektors mehrere hundert Millionen Male Dieselkraftstoff innerhalb von  $2\text{ }\mu\text{sec}$  mit  $2000\text{ km/h}$  Geschwindigkeit gedrückt wurde und vermutlich abrasive Wirkungen hinterlassen hat, können beim Stand der Technik noch nicht einmal präzise gemessen werden. Da mit diesen Umstand auch die Produktion neuer Common Rail Injektoren zu kämpfen hat, beschreitet man dort den Weg, alle sich aus der unvermeidlichen Streubreite geometrischer Abmessungen (nicht nur der Düsenlöcher) vom theoretischen Sollwert ergebenden Abweichungen bei den Einspritzungen softwaretechnisch zu kompensieren, indem der notwendige sogenannte IMA (Injektor-Mengen-Abgleich) bei der Endprüfung eines Injektors ermittelt wird und dem Motorsteuergerät die zur Kompensation geeigneten Korrekturgrößen (z. B. jeweiliger Einspritzbeginn und jeweiliges Einspritzende) individuell pro Injektor einprogrammiert werden.

### 3.5 Wertung des Standes der Erkenntnisse

Die Refabrikation von Kfz-Ersatzteilen wird als bedeutender Industriezweig von ökonomischer und ökologischer Relevanz, dem Zukunftspotential attestiert wird, von einer Reihe wissenschaftlich tätiger Autoren gewürdigt. Hierbei findet sich jedoch noch keine Arbeit, die auf moderne Diesel-Einspritzsysteme und insbesondere Common Rail Injektoren eingeht.

Auch zu technologischen und organisatorischen Verbesserungs- und Optimierungsmöglichkeiten der Refabrikation sind erste Arbeiten veröffentlicht worden. Diese enthalten jedoch keine auf die besonderen Gegebenheiten der Refabrikation von Common Rail Injektoren anwendbaren Erkenntnisse.

Bemerkenswert sind weiterhin bereits früh erschienene Veröffentlichungen zur methodischen Evaluierung der Eignung technischer Produkte zur Refabrikation. Da vor über zwanzig Jahren zum Erscheinungszeitpunkt des meistzitierten einschlägigen Werks [STE93] jedoch Common Rail Einspritzsysteme noch nicht einmal auf dem Markt waren, fand deren Bedeutung darin natürlich keinen Niederschlag.

Bei der Kfz-Instandhaltung, d. h. im Kfz-Handwerk, reihen sich Common Rail Injektoren in den Reigen der dominant gewordenen Kfz-Mechatronikkomponenten ein, für die es vor Ort keine Reparaturmöglichkeit und auch nur allenfalls eingeschränkte Diagnose- und Reinigungsmöglichkeiten gibt. Um auf kostenträchtige neue Ersatzteile verzichten zu können, benötigen das Kfz-Handwerk und seine Kunden Common Rail Injektoren aus der Refabrikation.

Wertet man somit den Stand der Erkenntnisse, so ergeben sich eine Reihe dringlicher Anlässe sowie auch ein vehementer Antrieb zur Anfertigung der vorliegenden Arbeit.

## 4. Untersuchungen und Empfehlungen zu Ausfallursachen, Diagnose, Service und Ausbau von Common Rail Injektoren im Kfz-Handwerk

### 4.1 Systemische Ausfallursachen und Symptomatik

Common Rail Injektoren versagen in aller Regel nicht als solche – sie sind sehr präzise gefertigt und für höchste Beanspruchung innerhalb der vorgesehenen Betriebszustände zwischen Leerlauf und Dauer-Volllast ausgelegt.

Injektoren leiden jedoch schnell unter den Folgewirkungen, wenn eines der zahlreichen Elemente im elektronisch geregelten Gesamtsystem, dem sie angehören, Ab-

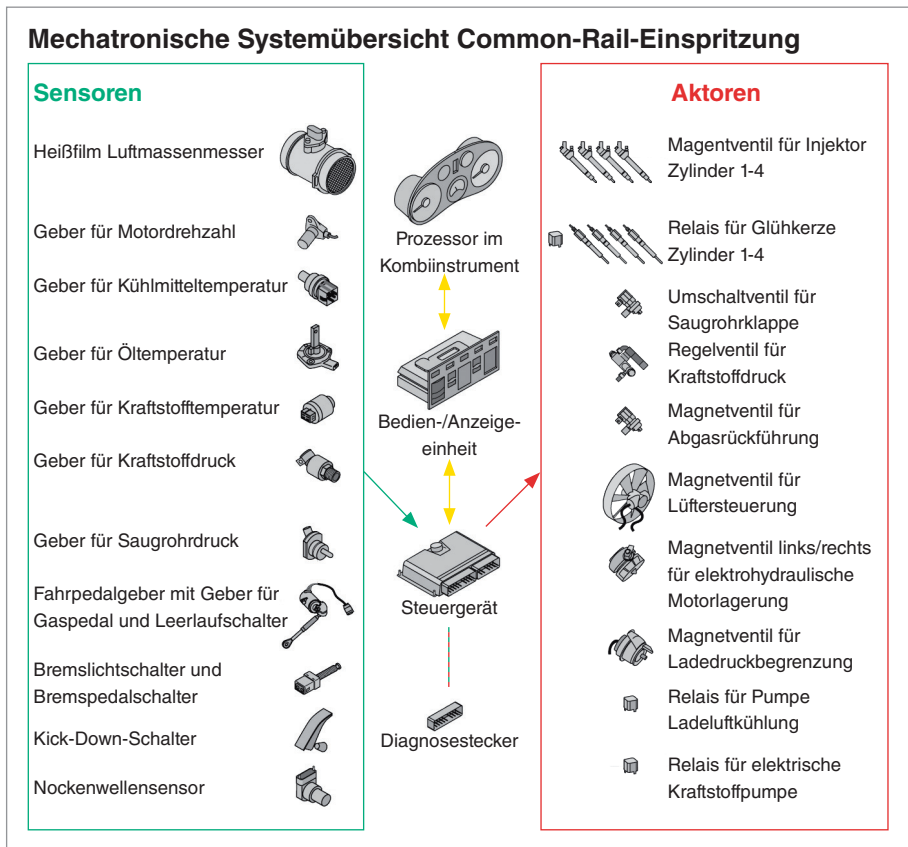


Abbildung 25: Mechatronische Systemübersicht Common-Rail-Einspritzung

Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel



bildung 25, nicht mehr ordnungsgemäß arbeitet und der Fahrbetrieb – mit oder ohne Kenntnis des Problems - weiter fortgesetzt wird.

Hierbei wird der Ausfall oder eine Fehlfunktion eines der zahlreichen in Abbildung 25 gezeigten Signalgeber und Sensoren noch vergleichsweise schnell und frühzeitig erkannt und dem Fahrer angezeigt, doch kann auch das Zusammenwirken mehrerer, sich teilweise gegenseitig aufhebender (bzw. die Sensoren täuschender) Probleme zu mechanischen Schäden führen - sowohl bei Magnetventil-/und Piezo-Injektoren in Common Rail Systemen als auch bei Pumpe-Düse-Elementen: Beispiele sind partieller Trockenlauf von Pumpe-Düse-Injektoren und damit mechanische Schäden aufgrund zu geringen Kraftstoffdrucks im Versorgungssystem (etwa wegen verstopfter Kraftstofffilter, Undichtigkeiten oder zurückgegangener Förderleistung der Pumpe nach [REI10]), oder dasselbe bei Magnetventil- oder Piezo-Injektoren aufgrund nicht normgerechten Kraftstoffs mit unzureichenden Selbstschmierungseigenschaften [GSC13].

Verunreinigungen im Kraftstoff, Wasser im Kraftstoff und ggf. Bioanteile auf der Kraftstoffseite sind insgesamt eine Schadensursache mit Querschnittscharakter, der sich auch durch die überaus aufwendige Sensorik laut Abbildung 25 nicht wirksam vorbeugen lässt. So ist es unter bestimmten Konstellationen nahezu unausweichlich, dass eine Kausalkette „*Abweichung-Fehler-Störung-Schaden*“ mit diversen Interdependenzen zur Erlebnis- und Erfahrungskette „*Ursache-Wirkung-Folge*“ nach [WES97] in Bewegung kommt, Abbildung 26, in deren Konsequenz dann nur noch der Ausbau und Austausch des Injektors im Kfz-Handwerk und dessen Ersatz durch ein Teil aus der Neuproduktion oder eben aus der Refabrikation einen gangbaren Weg bietet.

Bevor es jedoch zu unerwünschten Schäden, bzw. Wirkungen und Folgen kommen muss, lassen sich zahlreiche Abweichungen, Fehler oder Störungen anhand offenkundiger Symptome auch rechtzeitig entweder vom Fahrer selbst oder von System erkennen, anzeigen oder speichern, so dass den Ursachen nachgegangen werden kann, bevor größerer Schaden entsteht:

#### **4.1.1 Offenkundige Symptome**

Typische vom Fahrer wahrnehmbare Symptome, die auf Fehler oder Störungen im Common Rail System hindeuten, sind häufig die folgenden

- Motor springt nicht oder nur schlecht an
- Motor läuft unrund
- Motor ruckelt beim Beschleunigen
- Fahrzeug hat starke Rauch-/Rußentwicklung
- Fahrzeug hat verminderte Fahrleistungen
- Motor nagelt stärker als gewohnt

Nur beim letzten Symptom ist zumindest die Ursache naheliegend: es findet keine oder keine ausreichende Voreinspritzung statt (deren Hauptzweck es ist, das „berüchtigte“

## Begriffe zu Mängeln technischer Systeme und zeitliche Abfolge

### Begriffe zur Beschreibung von Mängeln und Problemen technischer Systeme

#### Abweichung

DIN 55350-12: Unterschied zwischen einem Merkmal oder einem dem Merkmal zugeordneten Wert und einem Bezugswert

#### Fehler

DIN 55350-11: Nichterfüllung einer Forderung  
DIN 40042: Unzulässige Abweichung eines Merkmals

#### Störung

DIN 40014: Fehlende, fehlerhafte oder unvollständige Erfüllung einer geforderten Funktion durch eine Einheit.  
DIN 31051: Im Sinne der Instandhaltung unbeabsichtigte Unterbrechung der Funktionserfüllung einer Betrachtungseinheit

#### Schaden

DIN 31051: Zustand einer Betrachtungseinheit nach Unterschreiten eines bestimmten Grenzwertes des Abnutzungsvorrats, der eine im Hinblick auf die Verwendung unzulässige Beeinträchtigung der Funktionseinheit bedingt.

### Zeitliche Abfolge beim Entstehen von Mängeln und Problemen

Ursache

Wirkung

Folge

Abbildung 26: Begriffe zu Mängeln technischer Systeme und zeitliche Abfolge nach Westkämper

Nageln des Diesels zu mindern). Die tieferen Gründe, bzw. (nach Abbildung 26) die Kausalkette aus zugrundeliegenden in Frage kommenden Abweichungen, Fehlern und Störungen, lassen sich jedoch – wie bei allen anderen Symptomen – nur mit einer umfassenden Systemdiagnose in der Kfz-Werkstatt ermitteln oder treten gar erst im Lauf der Refabrikation endgültig zutage (vgl. Kapitel 6 bis 8).

### 4.1.2 Gezielte Injektoren-Fehlerdiagnose in der Kfz-Werkstatt

Für moderne PKW und leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t mit Dieselmotor gelten bereits seit Januar 2003 umfassende gesetzliche Vorgaben zur sogenannten EOBD (Electronic On Board Diagnostics), denen zufolge sich ein Fahrzeug – zunächst hauptsächlich bezüglich seines Abgasverhaltens – selbst sehr gründlich und regelmäßig elektronisch zu testen und zu überwachen hat. Neben kontinuierlich laufenden Überwachungsfunktionen sind für besondere Funktionsprüfungen (z. B. die Prüfung von Sensorsignalen auf Plausibilität) auch definierte Überwachungsprotokolle vorgeschrieben.

Solche Selbsttests und Selbstüberwachungen haben sich inzwischen zu einer umfangreichen, im Fahrzeug installierten OBD (On Board Diagnose) ausgeweitet, in der Steuergeräte sich selbst, die Kommunikation untereinander sowie die beteiligten Sensoren und Aktoren überwachen.

Wird eine Fehlfunktion festgestellt, so signalisiert das Aufleuchten oder Blinken einer sogenannten MIL (Malfunction Indicator Lamp), meist noch mit einem Symbol für die betroffene Komponente, dem Fahrer, schleunigst eine Werkstatt aufzusuchen. Darüber hinaus werden erkannte Fehler von der OBD elektronisch in einem Fehlerspeicher abgelegt.

Bei besonders schwerwiegenden Fehlern schaltet das Steuergerät sogar auf eine Notlauffunktion mit stark reduzierter Motorleistung und Drehzahl zurück, um kapitalen Motorschäden vor Erreichen einer Werkstatt vorzubeugen.

Auf alle diese Informationen der OBD – ggf. gepaart mit einer Kundenbeanstandung zum erlebten Fahrverhalten – kann somit die Kfz-Werkstatt zugreifen, die mit einer OFD (Off-Board-Diagnostic) arbeitet, um die ursächlichen und/oder betroffenen Komponenten aufzuspüren.

Als Werkstatt-Diagnosesystem fungiert beim Stand der Technik in der Regel ein elektronisch mächtiges Offboard-Prüfgerät, oftmals fahrzeugindividuell per Internet mit dem Fahrzeughersteller verbunden, sowie ein zugehöriger mobiler PC-basierter Diagnosetester zur geführten Fehlersuche, der an die (genormte) OBD-Schnittstelle im Fahrzeug angedockt ist; plus – je nach zu prüfenden Komponenten – entsprechend anzuschließenden Prüflösungen, Abbildung 27.

In der Praxis finden sich solche Werkstatt-Diagnosesysteme entweder als spezifische Werkstatttester der jeweiligen Fahrzeughersteller, als Werkstatttester großer Kfz-Zulieferunternehmen (insbesondere BOSCH), oder als Werkstatttester freier Anbieter.

Da die Schaltpläne eines PKW, die noch in den 70er Jahren vollständig ausgedruckt auf ein DIN A4 Blatt (oftmals als Ausklappseite hinten in den Bedienungsanleitungen) passten, bei modernen Fahrzeugen ausgedruckt rund 10 Ordner mit je 1999 DIN A4

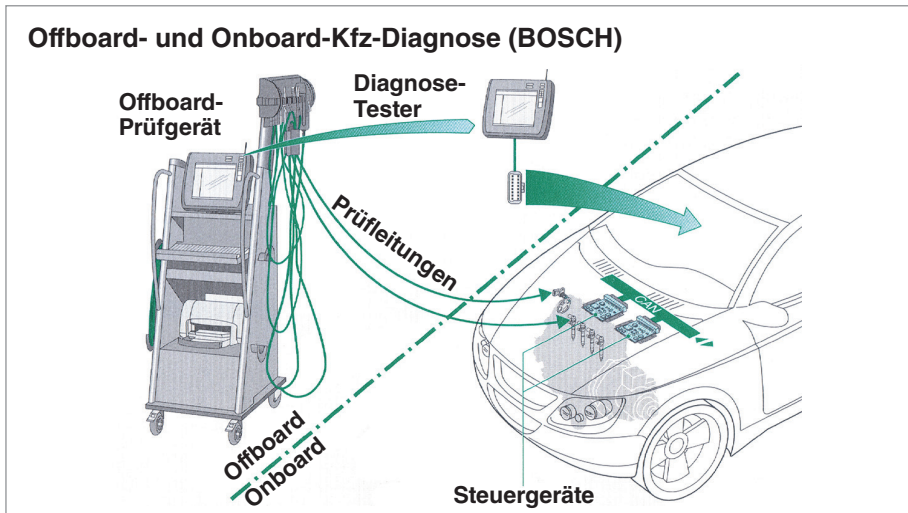


Abbildung 27: Offboard- und Onboard-Kfz-Diagnose  
Bildquelle: BOSCH

Seiten füllen würden, sind deren Funktionszusammenhänge für das ein Fahrzeug diagnostizierenden KFZ-Mechatroniker-Personal mental nicht mehr vorstellbar. Sie sind von ihm auch nicht mehr eigenständig analytisch durchdringbar.

Der/die Kfz-Mechatroniker/in wird daher im Dialog mit dem PC-basierten mobilen Diagnosetester menübasiert per Touchscreen durch die Fehlersuche geführt, bis er/sie die Fehlerursache bzw. die zu ersetzende Komponente (also das notwendige „Ersatzteil“ – angestrebt wird laut [GSC13] „die kleinste austauschbare Einheit“) identifiziert hat, Abbildung 28.

Hierbei sollte man bei modernen Dieselmotoren mit Common Rail und EDC (Electronic Diesel Control, vgl. Unterabschnitt 3.13) gezielt Menüpunkte anwählen, die bereits recht aussagefähige Rückschlüsse auf den Zustand einzelner Injektoren ermöglichen.

Eine wertvolle Grundlage hierfür bietet die in der EDC integrierte Laufruheregung, die dem Umstand gegensteuert, dass nicht alle Zylinder eines Motors bei gleicher Einspritzmenge das gleiche Drehmoment erzeugen, wofür Fertigungstoleranzen und Verschleißerscheinungen (insbesondere Kompressionsunterschiede der einzelnen Zylinder) verantwortlich sind. Da dieser Umstand nach den Arbeitstakten der jeweiligen Zylinder unterschiedliche Augenblicksdrehzahlen der Kurbelwelle ergibt, was die Laufruheregung mittels des Kurbelwellendrehzahlsensors erkennt, kompensiert die EDC dies durch unterschiedliche Korrektur-Einspritzungen pro Zylinder bzw. Injektor.

Zur gezielten Injektorendiagnose ist daher der Menüpunkt „Injektoranpassung“ (dieser

## Ablauf einer geführten Kfz-Fehlersuche

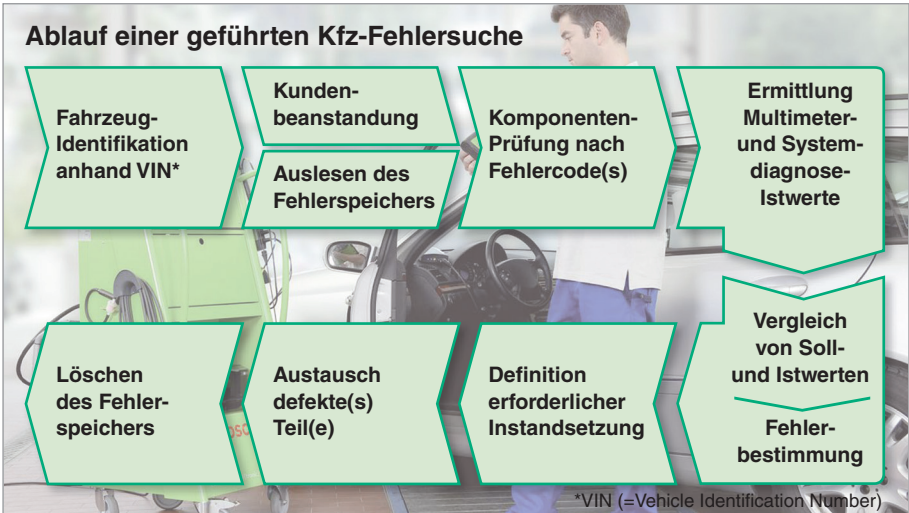


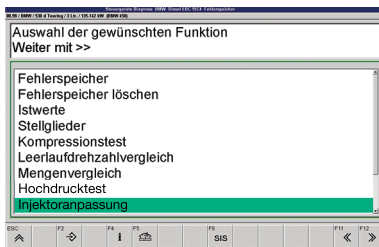
Abbildung 28: Ablauf einer geführten Kfz-Fehlersuche, Illustrationsquelle Hintergrundfoto: BOSCH

folgt auf den Menüpunkt „Hochdrucktest“ in Abbildung 29/links) anzuwählen, worauf der Diagnosetester dann die Korrekturmengen pro Zylinder (ersichtlich für einen Vierzylindermotor in Abbildung 29/rechts) anzeigt.

Deutliche Mengenkorrekturen nach oben (in Abbildung 29 bei Zylinder 3) deuten darauf hin, dass entweder dieser Zylinder schlechte Kompression hat oder aber der Injektor verschmutzt/verkocht ist bzw. seine Düsenlöcher nicht mehr frei sind. Deutliche

## Injektorendiagnose anhand der Korrekturmengen

### Fehlersuche-Werkstatttester-Menü



Menüpunkt: Injektoranpassung

### Ausgegebene Korrekturmengen

Korrekturmengen für Zylinder 1	-4.9 mm³/Hub
Korrekturmengen für Zylinder 2	-0.1 mm³/Hub
Korrekturmengen für Zylinder 3	5.2 mm³/Hub
Korrekturmengen für Zylinder 4	-0.6 mm³/Hub

Injektorendiagnose (spekulativ)

verschlissen?

verstopft?

Abbildung 29: Injektorendiagnose anhand der Korrekturmengen,

Bildquellen: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

Mengenkorrekturen nach unten (in Abbildung 29 bei Zylinder 1) deuten darauf hin, dass der Injektor entweder Leckagen hat (Nadel schließt nicht mehr dicht) oder die Düsenlöcher ausgewaschen sind. Hier lassen sich also wesentliche und wertvolle Diagnose-Erkenntnisse gewinnen, die nicht nur die Entscheidung Service vor Ort oder Refabrikation stützen können, sondern im letzten Falle auch an das Refabrikationsunternehmen weitergegeben werden sollten (vgl. Unterabschnitt 4.2.1).

#### 4.1.3 Schlüsse aus dem Fehlverhalten bei den Abgasemissionen

Die Mehrmals- und Mehrfach-Einspritzmöglichkeiten von Common Rail Injektoren dienen nicht nur dazu, eine möglichst gute Leistungsausbeute des Motors zu erzielen. Neben der Voreinspritzung, die über einen früheren und sanfteren Verbrennungsdruckanstieg primär das unerwünschte „Nageln“ des Diesels vermindert, sind alle weiteren Einspritzungen (inkl. auch die Nacheinspritzung) über weite Bereiche des Verbrennungsvorgangs von Bedeutung für den Umfang der notwendigen Abgasnachbehandlung durch Dieselkatalysator und Partikelfilter, Abbildung 30/links. Hierbei gelten Piezo-Injektoren aufgrund ihrer noch kürzeren Schaltzeiten und höheren Raildrücken tendenziell als etwas im Vorteil gegenüber Magnetventil-Injektoren, was die vorsorgliche Beeinflussung unerwünschter Abgasbestandteile (CO, HC + NOx, NOx und Partikel, Abbildung 30/rechts) anbelangt, Abbildung 30.

Somit sollte man bei festgestelltem Fehlverhalten des Fahrzeugs bei den Abgasemissionen im Falle von Magnetventil-Injektoren durchaus die Ursache auch im Einspritz-

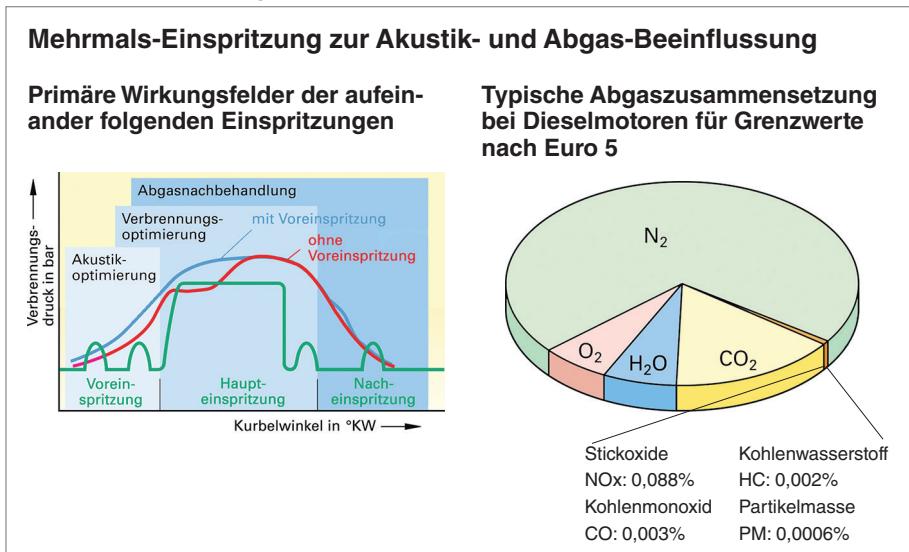


Abbildung 30: Mehrmals-Einspritzung und Abgas-Beeinflussung.  
Bildquelle: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

system vermuten – im Falle von Piezo-Injektoren sind dagegen eher die Komponenten zur Abgasnachbehandlung als erstes zu überprüfen.

#### 4.1.4 Nicht erkennbare Schäden

Bei den extrem hohen Drücken in Common Rail Systemen inkl. den bei den Einspritzungen entstehenden Druckwellen, die sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten und an den Wandungen reflektiert werden, sowie bei extrem hohen Strömungsgeschwindigkeiten auch an Verengungen und Biegungen im System kann es vorkommen, dass beim Zusammenwirken ungünstiger Effekte und Strömungsverhältnisse lokal momentane Unterdruckbereiche entstehen, die zur vorübergehenden kurzzeitigen Dampfblasenbildung führen. Diese Dampfblasen (oder gar Gasblasen) implodieren unmittelbar danach in Überdruckbereichen wieder und können dabei unerwünschte Energien hoher Zerstörungskraft freisetzen.

Wie Abbildung 31/links veranschaulicht, bilden implodierende Gasblasen regelrechte Keile oder Stachel, die mit hoher Geschwindigkeit auf Wandungen auftreffen und diese erodieren. Solche Phänomene nennt man Kavitation. Unerwünschte Kavitationsschäden können in Common Rail Einspritzsystemen an verschiedenen Stellen auftreten – in der Regel jedoch nicht in den Injektoren – und sind den Einspritzsystemkomponenten von außen nicht anzusehen. Sie sind nur erkennbar, wenn man die betroffenen Komponenten zerstörend halbiert, wie es zur Erkennung eines Kavitationsschadens in einer Hochdruckpumpe für Abbildung 31/rechts geschehen ist, Abbildung 31.

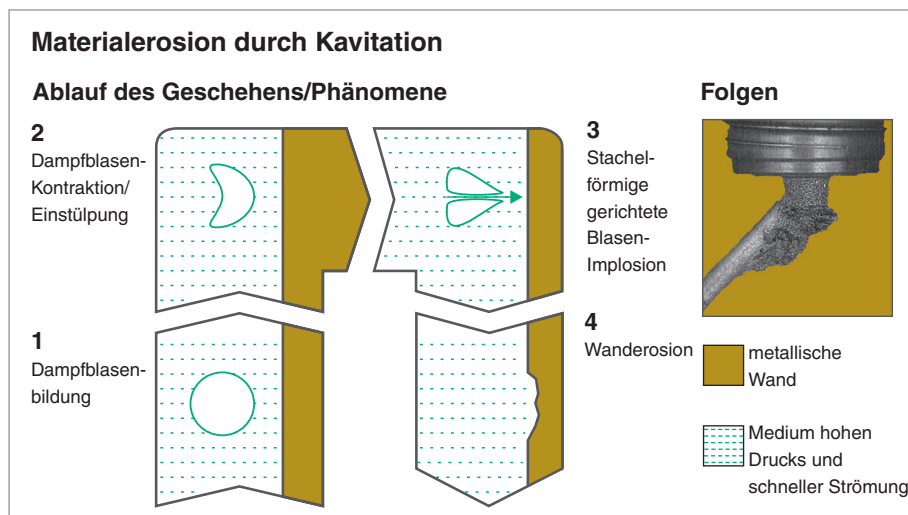


Abbildung 31: Materialerosion durch Kavitation, Bildquelle: BOSCH

Diffuse, nicht eindeutige Störungen und Fehler in Common Rail Einspritzsystemen können somit auch auf solche nicht erkennbare Schäden wie die Kavitation zurückzuführen sein – der/die in solchen Fällen dann zur Refabrikation eingelieferte/n Injektor/en sind dann jedoch in der Regel ohne zugehörigen Befund.

## **4.2 Weitergehende Handlungsempfehlungen**

### **4.2.1 Intensivierung der Kooperation und Kommunikation zwischen Kfz-Handwerk und Refabrikationsindustrie**

Kfz-Werkstätten arbeiten unter hohem Zeit- und Termindruck. Dieser verschärft sich noch, wenn unklare Fehlerbilder, oder wenn – wie häufig bezüglich mechatronischer Fahrzeugkomponenten beklagt [LUP13] – sporadisch auftretende Fehler zu bearbeiten sind. Hier sind in der Praxis Diagnose- bzw. Fehlersuchtätigkeiten, Komponententausch, Probelauf/Probefahrt nicht nur in Aufeinanderfolge, sondern auch im iterativen Wechsel anzutreffen, bis letztendlich die hoffentlich/wahrscheinlich (?) ursächliche Komponente dann gefunden und ausgetauscht ist. Eine nachvollziehbare Dokumentation der betroffenen Phänomene bei der Fehlerdiagnose, der Zustände einzelner Komponenten, die sukzessive ausgetauscht wurden und dann zur Refabrikation angeliefert werden, bleibt dabei in aller Regel auf der Strecke.

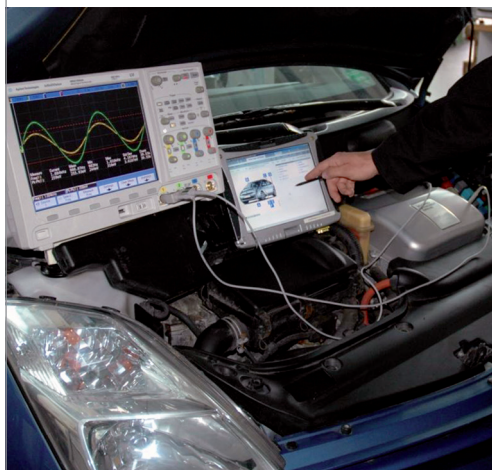
Noch heute ist es auch vielfach gängige Praxis, das Altteile gemischt gesammelt werden (Anlasser, Lichtmaschinen, Kupplungen, Servolenkungspumpen; mittlerweile auch Injektoren) und dann, wenn die Gitterbox voll ist, via einen so genannten Core Broker (angloamerikanisch für Altteilehändler) oder kooperierende Autoteile-Großhandelspartner an die Refabrikationsindustrie geliefert werden. Zwar hat sich das lange Jahre übliche unachtsame Handling der Altteile, bei dem so manche Beschädigungen erst im Zuge dessen entstanden, durch die „Back-in-the-Box“-Initiative eines großen Marktteilnehmers (BOSCH) inzwischen verbessert: die Altteile werden in der Verpackung/Schachtel an das Refabrikationsunternehmen zurückgeliefert, in der die Werkstatt das Austauschteil bezogen hat.

In der Schachtel befindet sich jedoch bis heute nur das Altteil; keine Information zu dessen Vorleben. Daher setzt sich der Verfasser hier nachdrücklich dafür ein, in absehbarer Zukunft die in der Werkstatt bei der Fehlerdiagnose und dem Ausbau des Teils quasi nebenbei gewonnenen, aber sehr wertvollen Informationen zu konservieren und mit dem Altteil zurückzuführen, Abbildung 32, da sie durchaus aufschlussreiche Hinweise für dessen Refabrikation enthalten können.

Eine Auflistung primär interessierender Informationen laut Abbildung 32 wird in einer dem Unternehmen des Verfassers angegliederten Kfz-Werkstatt derzeit hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und Nützlichkeit für den Refabrikationsprozess analysiert und wo erforderlich ergänzt.



## Kfz-Werkstatt-Informationen zum Injektoren-Vorleben



Kilometerleistung: 131000

Präferierte Kraftstoffart:

☒ Standard-Diesel

☐ Premium-Diesel

Einsatzland: Belgique

Fehlerspeicher-Code: P0148

 Textfeld: il y avait de l'eau dans  
le reservoir gazole

Abbildung 32: Kfz-Werkstatt-Informationen zum Injektoren-Vorleben

Mittelfristig und bei einer flächendeckenden Einführung sollte auch daran gearbeitet werden, solche Kommunikation und Kooperation zwischen Kfz-Werkstatt und Refabrikationsunternehmen nicht nur auf Papier, sondern auch mittels elektronischer Datenübermittlung (denkbar wäre eine Information auf einem RFID Begleitchip, der dem Altteil eindeutig zuordenbar ist) anzufügen und zu pflegen.

## 4.2.2 Reduzierung von Fehler-Fehlinterpretation und vorsorglichem Injektoren-Austausch „auf Verdacht“

Bei der überwiegenden Zahl der vom Verfasser untersuchten Kfz-Werkstätten, die unser Unternehmen mit Injektoren „auf Verdacht“ zur Refabrikation beliefern, war feststellbar, dass durchaus häufig der Austausch von Injektoren entschieden wurde. Hierzu hat der Verfasser im Jahre 2012 über einen Zeitraum von sechs Monaten mehr als ein-tausend eingelieferte Injektoren sofort einer Funktionsprüfung unterzogen, wobei sich diese zu einem erheblichen Anteil als mängelfrei erwiesen. Feststellbare Hintergründe hierfür waren:

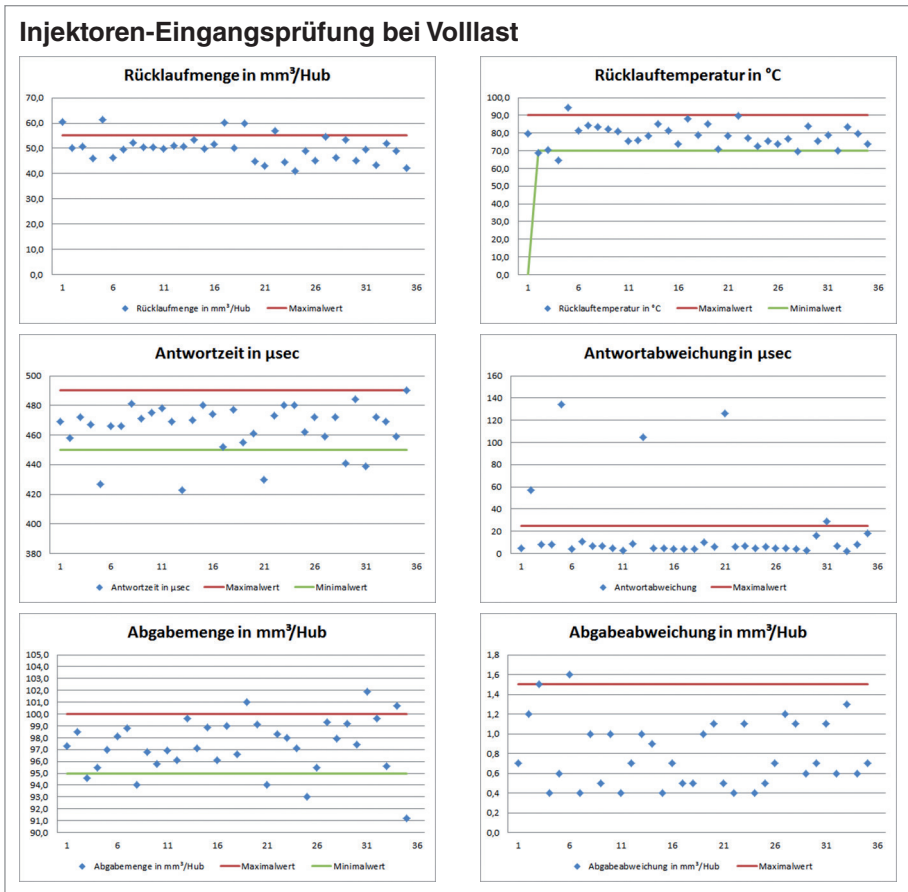


Abbildung 33a: Injektoren-Eingangsprüfung bei Vollast

Quelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

- Bei erwiesener Funktionsuntüchtigkeit eines Injektors eines Vierzylindermotors wurden und werden insbesondere während der Garantiezeit die drei Injektoren der drei anderen Zylinder „vorsorglich“ mit ausgetauscht.
- Bei uneindeutiger Fehlersymptomatik, nicht zweifelsfrei einer bestimmten Komponente zuordenbaren Fehlerspeichereinträgen sowie bei sporadisch auftretenden Fehlern im Einspritzsystem wurden und werden zuweilen vorschnell die Injektoren als ursächlich verdächtig und ausgetauscht.
- Bei noch geringen Erfahrungen der Kfz-Werkstätten mit Common Rail Einspritzsystemen bzw. auch in der Markteinführungszeit neuer Typen oder Bauarten kommt es ebenfalls zu vorschnellen Fehlentscheidungen. Darüber hinaus

### Injektoren-Eingangsprüfung bei Teillast

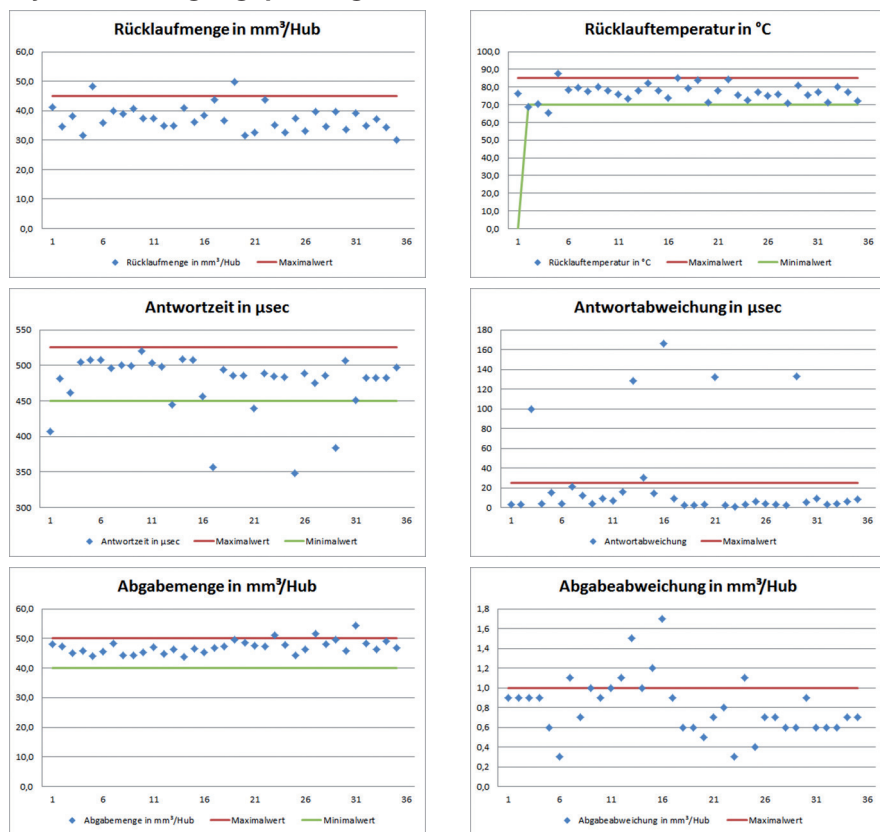


Abbildung 33b: Injektoren-Eingangsprüfung bei Teillast

Quelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

## Injektoren-Eingangsprüfung bei Leerlauf



Abbildung 33c: Injektoren-Eingangsprüfung bei Leerlauf

Quelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

wurden und werden im Zeitdruck – der Kunde möchte sein Fahrzeug abends wieder abholen – tendenziell mehr Komponenten ausgetauscht als im strengen Sinne notwendig.

In der Folge erhalten Refabrikationsunternehmen bis zu zwei Drittel der angelieferten Gesamtmenge funktionstüchtige Injektoren, die bereits bei der Eingangsprüfung auf einem seriengleichen Funktionsprüfstand innerhalb der zulässigen Toleranzen neuer Injektoren operieren. Abbildung 33 zeigt die typischerweise erfassbaren hohen Anteile funktionstüchtiger Injektoren einer Charge der eingangs erwähnten, vom Verfasser durchgeführten bzw. veranlassten Funktionsprüfungen direkt nach Einlieferung.

Dieser hohe Anteil funktionstüchtig eingelieferter Refabrikationsprodukte steht zwar im Einklang mit den einschlägigen Erfahrungen bei anderen Refabrikationsprodukten (Anlasser, Lichtmaschinen, Servolenkungspumpen, Motorsteuergeräte), doch speist sich deren Refabrikation auch aus Quellen des professionellen Alteilehandels aus Autoverwertungen, wo in der Tat voll funktionstüchtige Komponenten aus Schrott- oder Unfallfahrzeugen entnommen werden und zu Hunderttausenden weltweit im Handel sind. Injektoren kommen jedoch (noch) nicht in nennenswerten Stückzahlen aus solchen Quellen, sondern ausschließlich von Kfz-Werkstätten, bei denen Sachkunde und Entscheidungssicherheit beim Austausch einer Komponente vorausgesetzt werden müsste.

Der Verfasser plädiert deshalb nachdrücklich für Bemühungen um eine Reduzierung solcher nicht erforderlicher Austauschfälle, z. B. durch eine sehr gewissenhafte Ausschöpfung aller Möglichkeiten der geführten Fehlersuche wie im Unterabschnitt 4.2.1 erläutert.

Mit einem solchen Plädoyer schneidet sich ein Repräsentant der Refabrikationsindustrie zwar gewissermaßen „ins eigene Fleisch“, da bei dessen Befolgung dann in der Regel nur noch aufwändig zu refabrizierende funktionsuntüchtige Injektoren zur Refabrikation ankommen werden; doch man kann – wie im Unternehmen des Verfassers in Realisierung befindlich – diese Beeinträchtigung des wirtschaftlichen Ergebnisses auch kompensieren, indem man selbst eine angegliederte Kfz-Werkstatt betreibt, in der professionell, profitabel und zur Kundenzufriedenheit Einspritzsysteme und Injektoren diagnostiziert und instandgesetzt werden. Als Zusatznutzen kommt hierbei noch die Interaktion und der Erfahrungsaustausch mit dem kooperierenden eigenen Refabrikationsunternehmen (vgl. voriger Unterabschnitt 4.2.1) hinzu.

### **4.2.3 Nutzung neuer in-situ Injektoren-Reinigungsoptionen im Fahrzeug**

Bei der geführten Fehlersuche in der Kfz-Werkstatt eignet sich (vgl. Unterabschnitt 4.1.2) eine Aktivierung der Laufruheregulierung der EDC (Elektronik Diesel Control) und die zugehörige Ausgabe der vom Motorsteuergerät befehligten Korrektureinspritzmengen am Bildschirm, wobei signifikante Einspritzmengenkorrekturen nach oben auf verußte und verkockte in den Brennraum ragende Düsenenden des betreffenden Injektors und damit auf eine Beeinträchtigung des Einspritzstrahlbildes hindeuten.

Ist dies der Fall, so sollte nicht nur der in einigen Kfz-Werkstätten praktizierte vorübergehende Ausbau der Injektoren und deren Reinigung im Ultraschallbad (vgl. Unterabschnitt 3.3.3) erwogen werden. Ebenso kann ein durchschlagender Erfolg einer möglichen Reinigung der Injektoren ohne Ausbau im weiteren Fahrbetrieb durch Tanken des teureren hochreinen High-Performance-Dieselmotorkraftstoffs mit Reiniger-Zusätzen – bzw.

## In-Situ-Reinigung von Injektoren

### Situation bei fortgeschrittener Verunreinigung



### Situation nach In-Situ-Reinigung

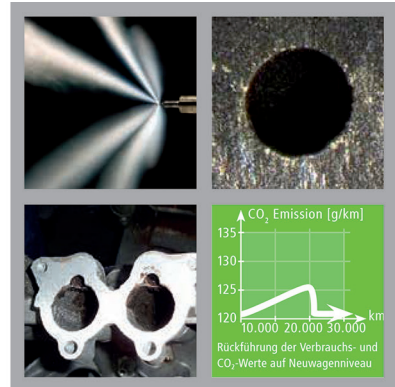


Abbildung 34: In-Situ-Reinigung von Injektoren  
Bildquelle: TUNAP INDUSTRIE CHEMIE GMBH

durch Zusetzen handelsüblicher Einspritzsystem-Reiniger zum Treibstoff – in diesem Stadium als noch nicht hinreichend gesichert angesehen werden.

Stattdessen plädiert der Verfasser dafür, ein in jüngerer Zeit am Markt erschienenenes in-situ-Reinigungskonzept für Common Rail Injektoren [TUN14] in Kfz-Werkstätten systematisch zu erproben. Dessen Wirkungs- bzw. Funktionsprinzip stellt sich wie folgt dar:

Ein spezielles Gemisch aus Kraftstoff und patentiertem chemischen Reiniger wird anstelle des Treibstoffs aus dem Diesel-Tank dem Motor zugeführt und der Motor damit für einen zeitlich definierten Reinigungszyklus betrieben. Auch auf der Abgasseite wird solange auf einen Alternativ-Auslass umgeflanscht, um nicht den Partikelfilter bzw. Katalysator des Fahrzeugs mit herausgelösten Verschmutzungen zu kontaminieren. Das Resultat einer solchen In-situ-Reinigung zeigt Abbildung 34 schematisch im Überblick.

Laut Auskunft des Anbieters wird diese In-situ-Reinigungskonzept von den Kfz-Werkstätten bisher allenfalls vereinzelt eingesetzt und befindet sich daher noch weiterhin in der Markteinführung bzw. Erprobung, für die sich auch der Verfasser dieser Arbeit interessiert bzw. nach Möglichkeit sich daran beteiligen wird. Mit belastbaren Ergebnissen dürfte jedoch erst in einigen Jahren zu rechnen sein.

Der Arbeitsaufwand hierfür – und damit die Lohnkosten – ist zwar durchaus nennenswert, liegt jedoch noch unterhalb des Material- und Arbeitsaufwands für mehrere zu ersetzende Injektoren aus der Neuproduktion oder Refabrikation.

Bewährt sich diese in-situ-Reinigung, so ist zwar ebenso wie im vorangegangenen Unterschnitt erwähnt, mit einem gewissen Rückgang der Anzahl zur Refabrikation angelieferter getauschter Injektoren zu rechnen. Da diese jedoch andernfalls durchaus mit Funktionsbeeinträchtigungen zurückkommen und somit Refabrikationsaufwand verursachen, ist keine Verschlechterung der Ertragssituation im Refabrikationsunternehmen zu erwarten.

Stattdessen kann, wie in Unterabschnitt 4.2.2. beschrieben, mit einer dem Refabrikationsunternehmen angegliederten Kfz-Werkstatt durch dortiges Anbieten solcher in-situ-Reinigungen im eingebauten Zustand zumindest für die Instandsetzungsfälle der Fahrzeugflotte in der umliegenden Großstadt ein interessantes Zusatzgeschäft realisiert werden.

#### **4.2.4 Erhöhung der Sorgfalt beim Injektoren-Ausbau**

Common Rail Injektoren sind sehr empfindliche Komponenten – bezogen sowohl auf ihr Äußeres als auch auf ihr Innenleben.

Entsprechend sorgfältig sollte in der Kfz-Werkstatt beim Ausbau von Injektoren aus dem Zylinderkopf vorgegangen werden, wenn eine Entscheidung zugunsten deren Austausch gegen einen neuen Injektor oder einen Injektor aus der Refabrikation gefallen ist.

So selbstverständlich dies klingt, so schwierig ist es allzu oft in der Werkstatt – insbesondere unter Zeitdruck – auch in die Tat umzusetzen:

Undichtigkeiten am Motor betreffend Motoröl oder Kühlwasser, von außen eindringender Schmutz und Staub bewirken bei den am Zylinderkopf vorherrschenden Temperaturen oftmals eingebrannte Ablagerungen, Verklebungen, Verharzungen und Verkorkungen rund um den Injektor, der häufig von all diesen Erscheinungen erst einmal freigelegt werden muss, bevor er beschädigungsfrei ausgebaut werden kann.

Zwar bieten Lieferanten einschlägiger Lösemittelchemikalien wirksame Reagenzien an, mit denen der betroffene Bereich eingesprüht werden kann, um sämtliche, auch erhebliche Verkrustungen vor dem Injektorausbau zu lösen, Abbildung 35.

Diese benötigen jedoch Einwirkzeit, und in der Kfz-Werkstatt herrscht Zeitdruck, da der Kunde abends sein Fahrzeug instandgesetzt zurück erwartet.

Dem zufolge kommt es durchaus auch zu voreiliger Gewaltanwendung, wenn ein besonders feststehender Injektor zügig ausgebaut werden soll. Resultierende Beschädigungen am Injektor, die im Übrigen auch entstehen können, wenn markenunabhängige Kfz-Werkstätten nicht über die notwendigen Spezialwerkzeuge verfügen oder letztere nicht eingesetzt werden, führen dann zur Nichtaufarbeitbarkeit des Injektors.

Neben intensiver Informations- und Aufklärungsarbeit inkl. zugehöriger Appelle an die



### Beschädigungsfreier Ausbau verkrusteter Injektoren



Abbildung 35: Beschädigungsfreier Ausbau verkrusteter Injektoren,  
Bildquelle: KS Tools

Kfz-Werkstätten, die Injektoren sorgfältig und sachgerecht auszubauen, kann seitens der Refabrikationsindustrie hier nur gegengesteuert werden, indem für offenkundig beim Ausbau beschädigte Injektoren der betreffenden Kfz-Werkstatt kein Pfandwert für das Altteil vergütet wird. Diese Handlungsweise hat auch bei anderen Austauschteilen in der Vergangenheit bereits gewirkt bzw. zu signifikanten Zustandsverbesserungen der zurückgeführten Altteile geführt. Sie benötigt jedoch (statt „anonymer“ Altteile) eine zweifelsfreie Rückverfolgbarkeit des Altteils in die anliefernde Kfz-Werkstatt – eine Forderung, die mit den vom Verfasser in Unterabschnitt 4.2.1 empfohlenen Maßnahmen dann jedoch ebenfalls erfüllt werden kann.



### 4.3 Typische Schadensbilder an Injektoren

Für die vorliegende Arbeit wurden Schadensbilder an mehreren Tausend zur Refabrikation angelieferten Injektoren begutachtet und kategorisiert. Zwei dominante Kategorien, die bereits bei der Anlieferung auffallen, sind nachfolgend dargestellt.

#### 4.3.1 Schäden durch unsachgemäßen Ausbau

Wurden beim Ausbau der Injektoren, wie im vorausgegangenen Unterabschnitt erläutert, elementare Sorgfaltspflichten vernachlässigt und stattdessen Gewalt angewendet, können irreparable Beschädigungen elektrischer und hydraulischer (Hochdruck-)Anschlüsse die Folge sein, für die Abbildung 36 zwei typische Fälle/Beispiele zeigt.

Neben dem Ausbau sind auch unsachgemäße Lagerung und Transportvorgänge häufige Ursachen von Beschädigungen an Injektoren. Es empfiehlt sich daher, insbesondere die elektrischen und hydraulischen Anschlüsse während der diversen Logistikstationen zwischen Kfz-Werkstatt und Refabrikationsunternehmen in geeigneter Weise zu schützen. Eine zugehörige, in Abbildung 36/links ersichtliche Gewindeschutzklappe kann im gezeigten Fall ihrem Zweck allerdings nicht mehr gerecht werden, da der Injektor anderweitig, nämlich beim elektrischen Anschluss, beschädigt wurde und aus diesem Grund zumindest der Aktormodul nicht mehr verwendet werden kann.



Abbildung 36: Beschädigung elektrischer und/oder hydraulischer Injektoranschlüsse,

Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

### 4.3.2 Schäden aus dem Fahrbetrieb

Mechanische Überbeanspruchung, Heißlaufen oder weit fortgeschrittener Verschleiß kritischer Motorkomponenten können bekanntermaßen zu schweren Motorschäden führen, die jeder Motoreninstandsetzungsbetrieb in klassischen Erscheinungsbildern wie Lagerschäden an Pleuel-, Kurbelwellen- oder Nockenwellenlagern, Löchern im Kolbenboden, Fresserspuren am Kolbenhemd und/oder an den Zylinderwänden sowie an verbrannten oder gebrochenen Ventilen kennt. Im Zuge des Herannahens solcher Erscheinungen – oder schon vorher – sind bei Dieselmotoren häufig auch die Injektoren betroffen, was sich nach deren Ausbau (bzw. bei Anlieferung im Refabrikationsunternehmen) dann in zugehörigen Schadensbildern zeigt, Abbildung 37.

#### Verformungen von Düsen und/oder Verkokungen von Sitzen

**Mechanisch**  
(Motorschaden)



**Kontaminatorisch**  
(Undichtigkeit)



**Thermisch**  
(Überhitzung)



Abbildung 37: Verformungen von Düsen und/oder Verkokungen von Sitzen,  
Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

Im Unterschied zu den aufgrund unsachgemäßen Ausbaus von Injektoren (vgl. Unterabschnitte 4.2.4 und 4.3.1, Abbildung 36) diesen zugefügten Beschädigungen, die meist den Aktormodul oder den Injektorkörper betreffen, können Beschädigungen der Düseneinheit durch Überbeanspruchung im Fahrbetrieb durch Austausch derselben in der Refabrikation jedoch meist mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand nochmals wieder gutgemacht werden. Dies wird in den Kapiteln 6 bis 8 erläutert werden.

Zuvor wird im nachfolgenden Kapitel 5 noch die notwendige Beurteilung der Eignung von Common Rail Injektoren ausgearbeitet – nicht nur bezüglich der hier bereits tangierten technischen, sondern auch bezüglich einer Reihe weiterer wichtiger Kriterien.

## **5. Evaluierung der Eignung von Common Rail Injektoren zur Refabrikation/zum Produktrecycling**

Führt man eine Bewertung der Eignung von Common Rail Injektoren zunächst anhand der in [STE93] in ihren Grundzügen vorgestellten Kriterienkataloge und Portfoliomeethoden durch, so ergeben sich – dies darf hier vorweg genommen werden – durchaus aussichtsreiche Feststellungen. Auch weitere, vom Verfasser aus der eigenen Unternehmenspraxis abgeleitete, nicht ausschließlich technisch/wirtschaftliche Kriterien führen zu positiven Evaluierungsergebnissen.

Im Folgenden werden die erarbeiteten Evaluierungsergebnisse durch eine Positionierung von Common Rail Injektoren in verschiedenen Portfoliodarstellungen, die die Literatur [STE93], [BUL09] empfiehlt, illustriert. Hierbei werden zur besseren Einschätzbarkeit der Positionierung auch andere Kfz-Austauschteile zum Vergleich eingetragen – und es wird die Refabrikation verallgemeinert als Produktrecycling bezeichnet, um eine Dualität zum Begriff Materialrecycling in den zugehörigen Abbildungen herzustellen. Die bei den Positionierungen zugrunde gelegten Zahlenwerte finden sich in zwei Tabellen im Anhang und können bei Bedarf auch variiert werden.

### **5.1 Technische Kriterien**

Um für eine Refabrikation bzw. zum Produktrecycling geeignet zu sein, muss ein Produkt - und zwar hier mit dem in mittelständischen Unternehmen nutzbaren Stand der Technik – zerstörungsfrei demontierbar, reinigbar, prüfbar, aufarbeitbar und wieder montierbar sein.

Diesen Forderungen genügen Common Rail Injektoren grundsätzlich, da sie herstellerseitig bewusst für Instandsetzungen (und damit auch zum Produktrecycling) konstruiert und produziert wurden: Sie sind mehrteilig und zerlegbar gebaut, so dass ein Ersatz einzelner Bauteile und eine Wiederverwendung aller anderen Bauteile ermöglicht wird.

In einer bemerkenswert hohen Anzahl von günstigen Fällen (Austausch von Injektoren in der Kfz-Werkstatt „auf Verdacht“; vgl. Unterabschnitt 4.2.2) liegt die Quote wiederverwendbarer Bauteile – im Vergleich zu den Quoten anderer KFZ-Austauschteile – sogar besonders hoch. Dem gegenüber stehen am anderen Ende der Zustandsskala (stark verschlissene Injektoren mit unbekanntem Vorleben oder Beschädigungen, vgl. Unterabschnitt 4.3.2) auch Fälle, bei denen die Technik der Refabrikationsschritte Reinigung, Prüfung, Aufarbeitung sowie die Querschnittsfunktion Qualitätssicherung besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt verdient. Im Zweifel dürfen Bauteile nicht wiederverwendet werden bzw. kann gleich der komplette Injektor „verschrottet“, d. h. unzerlegt dem Materialrecycling zugeführt werden, für das er sich aufgrund seiner geringen Material-

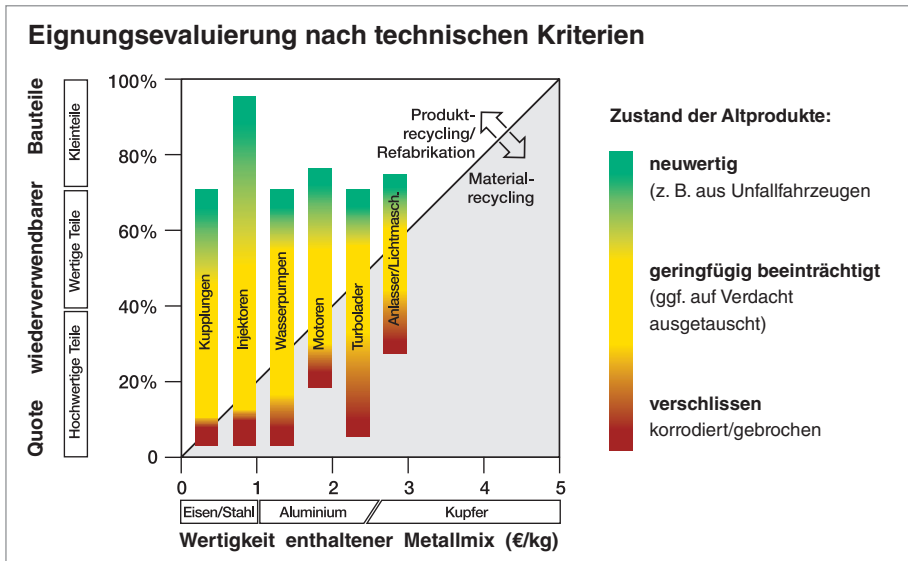


Abbildung 38: Eignungsevaluierung nach technischen Kriterien

vielfalt (es dominieren Bauteile aus Stählen ) ebenfalls unmittelbar eignet. Die Positionierung im zugehörigen Portfolio zeigt Abbildung 38.

Insgesamt fällt die Evaluierung bezüglich technische Kriterien also zugunsten einer ausgeprägten Eignung von Injektoren zum Produktrecycling/zur Refabrikation aus. Eine Eignung zum Materialrecycling ist grundsätzlich ebenfalls gegeben. Somit bedarf es der Evaluierung hinsichtlich weiterer Kriterien, wie Mengen- und Wertkriterien, um die Entscheidung zugunsten einer Refabrikation ggf. noch weiter zu stärken.

## 5.2 Mengenkriterien und Logistikaufwand

Für eine Amortisation der notwendigen Investitionen, also das profitable Zustandekommen einer seriellen industriellen Refabrikation mit Größendegression der Kosten, zugehörigen Optimierungspotentialen etc., müssen zu refabrizierende Produkte in ausreichender Menge und in einem logistisch bezahlbaren Einzugsbereich verfügbar und nachgefragt sein.

Dieser Forderung genügen Common Rail Injektoren in besonderem Maße: sie sind bei rund 100 Millionen zugelassenen Dieselfahrzeugen in Europa (vgl. Abschnit 1.3 und Abbildung 6) und durchschnittlich 4 Injektoren pro Fahrzeug bereits 400-Millionenfach im Markt. Somit werden – bei einer branchenüblichen eher gering eingeschätzten Ausfallrate von 0,1 % – pro Jahr bereits derzeit 400.000 Stück als Ersatzteile nachgefragt sein. Sie verursachen aufgrund ihrer Kompaktheit und ihres geringen Gewichts selbst

in großflächigen Einzugs- und Vertriebsbereichen auch kaum Logistikkosten. Geht man davon aus, dass etwa die Hälfte der Ersatzteilmachfrage durch neuproduzierte Injektoren befriedigt wird, so bleiben für die Refabrikationsindustrie arbeitstäglich 1000 Injektoren – oder 20 Refabrikationslinien in 8-Stunden-Schichten mit einer Taktzeit von 10 Minuten pro Injektor. Prognostiziert bzw. variiert man die Anzahl Dieselfahrzeuge im Markt und die Ausfallraten für zukünftige Szenarien z. B. 2020 und 2025, so ergeben sich noch größere Mengen. Insgesamt fällt die Eignungsbeurteilung von Common Rail Injektoren nach Mengenkriterien und Logistikaufwand somit eindeutig zugunsten des Produktrecycling/der Refabrikation aus, wie dies auch bei anderen typischen Kfz-Ausbauteilen der Fall ist, die teils in noch deutlich größeren Stückzahlen nachgefragt werden, aufgrund ihres um ein Vielfaches höheren Gewichts aber zugehörig höhere Logistikkosten verursachen und daher beim bezahlbaren Einzugsbereich Abstriche hinnehmen müssen bzw. dem Materialrecycling zuzuführen sind.

Abbildung 39 verdeutlicht, dass Injektoren, selbst wenn sie „nur“ in einer Stückzahl von 200.000 pro Jahr die Refabrikation durchlaufen, was der augenblicklichen Situation nahekommen dürfte, bereits einen weltweiten Einzugsbereich logistisch rechtfertigen.

### 5.3 Wertkriterien

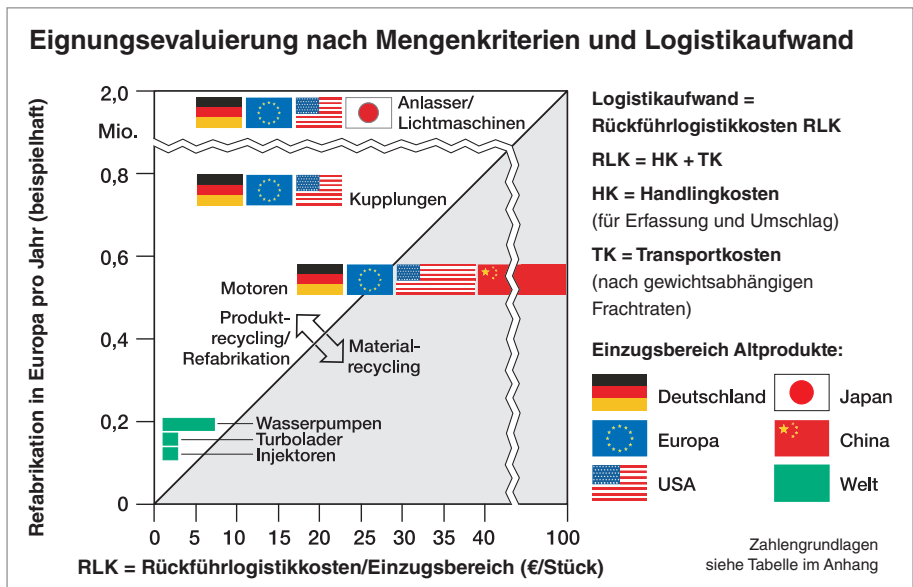


Abbildung 39: Eignungsevaluierung nach Mengenkriterien und Logistikaufwand

Maschinenbauliche Produkte eignen sich umso mehr zur Refabrikation/zum Produktrecycling, je stärker ihr Fertigungswert, also der Aufwand zur Veredelung des Ausgangsmaterials, ins Verhältnis zum reinen Materialwert („Schrottwert“) gesetzt, im Vordergrund steht. Bei Common Rail Injektoren ist dieser Fertigungswert ausgesprochen dominant, da wenige hundert Gramm Stahl produktionstechnisch in Bauteile bisher nicht dagewesener Präzision in engsten Toleranzbändern sowie bisher im Kfz-Bereich unerreichter Oberflächengüte transformiert wurden und dieser Veredelungswert nur durch Refabrikation wiedergewinnbar ist.

Dies führt zu einer herausragenden Positionierung von Common Rail Injektoren im Portfolio Wertkriterien in Abbildung 40.

## 5.4 Zeitkriterien

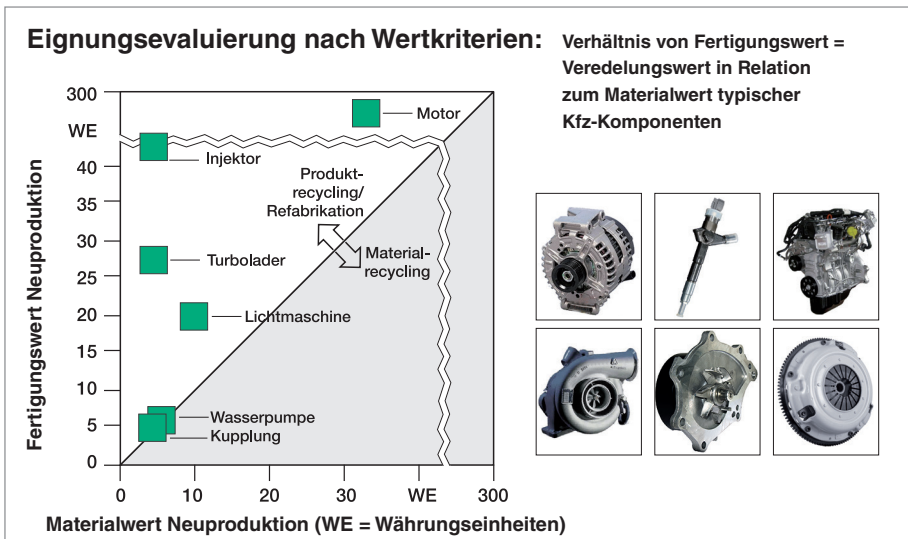


Abbildung 40: Eignungsevaluierung nach Wertkriterien,  
Illustrationsquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Kfz-Komponenten)

Refabrikation macht insgesamt nur dann Sinn, wenn die Zeitspanne der Marktpräsenz einer bestimmten Produktklasse deren durchschnittliche Zeitspanne bis zu einem Ausfall (ingenieurwissenschaftlich als MTBF = „MEAN TIME BETWEEN FAILURES“ bezeichnet) deutlich übertrifft – wenn möglich um ein Mehrfaches. In anderen Fällen bestünde für die Refabrikation keine ausreichende Nachfrage, auch wenn sie technisch und wertmäßig möglich wäre.

Auf Kfz-Ersatzteile bezogen, müssen Fahrzeuge also deutlich länger im Verkehr sein, als die zu refabrikierenden Ausfallteile/Austauschteile durchschnittlich halten. Dies ist bei klassischen Produkten der Kfz-Austauschteile-Refabrikation, wie Anlasser, Lichtmaschinen, Turboladern etc. durchweg der Fall.

Hierbei darf das Phänomen, dass das gleiche Produkt, etwa ein Turbolader, im Fahrzeugleben des Besitzers A viermal ausfällt und ausgetauscht werden muss, während es im gleichen Fahrzeug des Besitzers B ein Leben lang hält, außer Acht gelassen werden. Hier spielen teils bekannte Einflüsse, wie Fahrweise und Betriebsarten, teils auch unbekannte Einflüsse, wie Herstellungsmängel oder Zufallsausfälle, für alle Klassen von Refabrikationsprodukten die gleiche – einen bestimmten Prozentsatz an kürzerlebigen Ausfallteilen gibt es somit immer.

Für eine diesbezüglich belastbare Aussage bezogen auf Common Rail Injektoren war es im Zeitraum der Erstellung dieser Arbeit noch reichlich früh – vergleichsweise kurz ist nämlich noch der Erfahrungszeitraum seit der Einführung dieser hochbeanspruchten Komponenten in die Fahrzeugantriebe – und zu wenig repräsentativ sind die bisherigen Erkenntnisse zu Ausfallraten, wiederkehrenden Ausfallhäufigkeiten und Ausfallursachen.

Der Verfasser geht jedoch auf Basis der empirisch ermittelten Erkenntnisse aus seiner Berufspraxis davon aus, dass Common Rail Injektoren mindestens so häufig und schnell versagen werden wie geläufige Kfz-Refabrikationsprodukte – sehr wahrscheinlich in Größenordnungen, die vergleichbar oder höher liegen als bei einem gleichfalls sehr hoch belasteten Kfz-Austauschteil: dem Abgasturbolader. Dieser – ebenso im Spektrum der im Unternehmen des Verfassers aktuell refabrikerten Kfz-Ersatzteile – zählt zu den am dynamischsten wachsenden Kfz-Refabrikationsprodukten der Gegenwart.

Untermauert wird die Einschätzung des Verfassers durch die Tatsache, dass im Untersuchungs- und Versuchszeitraum dieser Arbeit zu 50 % Garantiefälle von Injektoren zur Refabrikation eingeliefert wurden – mithin also Produkte, die keine zwei Jahre durchgehalten haben. In einer „Badewannenkurve“, wie sie in der Zuverlässigkeitswissenschaft salopp bezeichnet wird, zählen diese 50 % Garantiefälle zu den dort so genannten Frühausfällen, Abbildung 41.

Für eine Prognose der in dieser „Badewannenkurve“ dann nachfolgenden Zufallsaus-

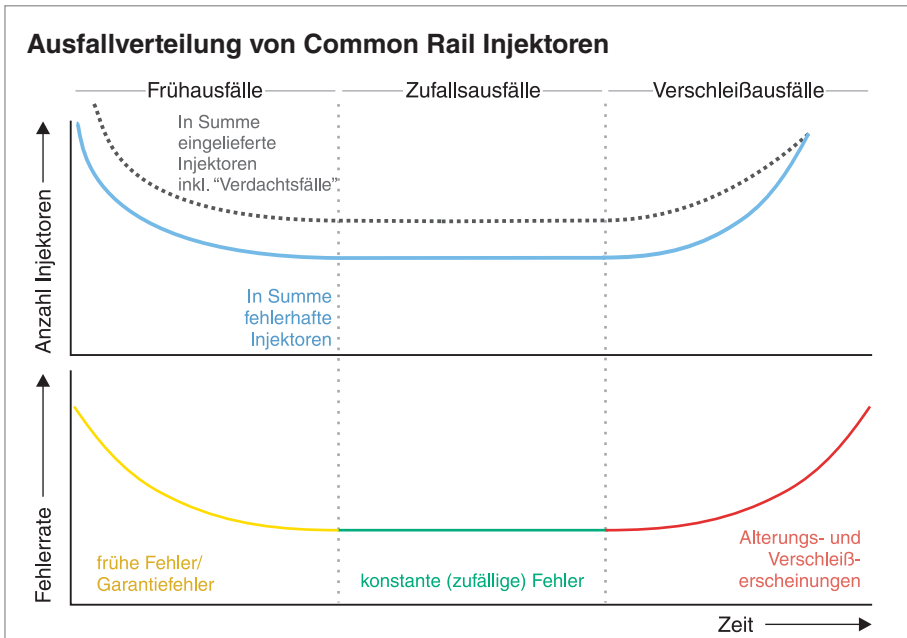


Abbildung 41: Ausfallverteilung von Common Rail Injektoren

fälle sowie Verschleißausfälle ist es, wie eingangs begründet, derzeit noch zu früh. Um dennoch zu einer Positionierung von Common Rail Injektoren in einem Portfolio nach Zeitkriterien zu gelangen, sei nachfolgend für die (belegte) Garantiefallrate von 50 % der zu refabrikierenden Injektoren eine durchschnittliche Zeitspanne von einem Jahr bis zum Ausfall angesetzt – und für die (spekulativen) nachfolgenden Zufalls- und Verschleißausfälle die fünffache Zeitspanne bis zum Ausfall: fünf Jahre (dies als ein Mittelwert zwischen den Ausfallzeitspannen von Anlassern, Lichtmaschinen und Turboladern). Damit ergibt sich rechnerisch eine mittlere Nutzungszeit der Ausfallteile von drei Jahren. Diese beträgt nur ein Fünftel der Marktverweilzeit zugehöriger Fahrzeuge bzw. Motoren (drei Jahre Produktionszeit ohne Konstruktionszeit plus 12 Jahre Verweilzeit des letzten so produzierten Fahrzeugs im Markt).

Eine entsprechende Positionierung von Common Rail Injektoren im zugehörigen Portfolio nach Zeitkriterien fällt somit ebenfalls überzeugend zugunsten der Refabrikation/ des Produktrecycling aus, Abbildung 42.



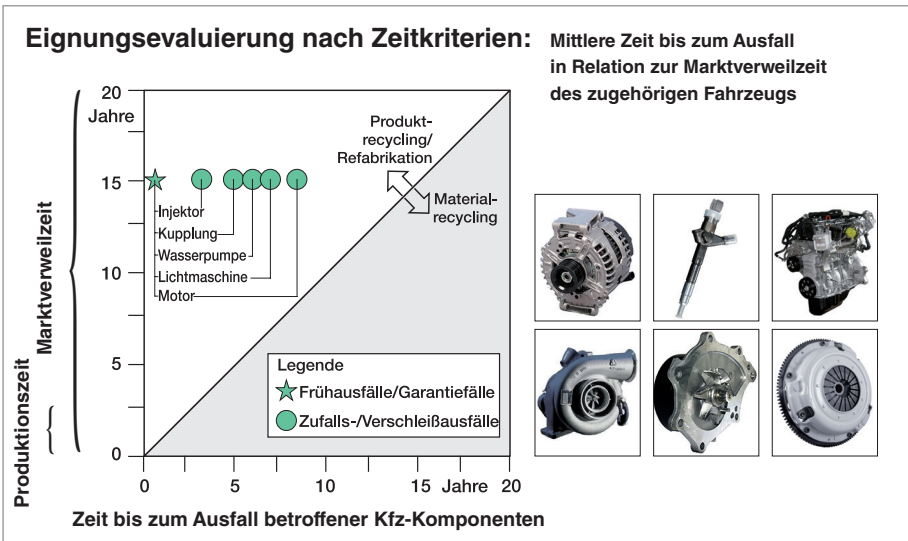


Abbildung 42: Eignungsevaluierung nach Zeitkriterien,  
 Illustrationsquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Kfz-Komponenten)

## 5.5 Innovationskriterien/Modernisierungskriterien

Refabrikationsprodukte finden grundsätzlich dann keine Aufnahme in den Märkten mehr, wenn konkurrierende Neuprodukte inzwischen auf einem technisch/wirtschaftlich höheren Niveau angeboten werden und daher die bessere Wahl darstellen. So wird beispielsweise ein refabriziertes Mobiltelefon niemals einen Käufer finden, wenn zwischenzeitlich der Innovationsfortschritt für leistungsfähigere und zugleich erschwingliche neue Produkte auf demselben Markt gesorgt hat.

Dort, wo Innovationszyklen heutzutage kürzer sind als mittlere Nutzungszeiten der Produkte, findet daher in aller Regel keine Refabrikation statt - allenfalls aus sozialen, karitativen oder ökologischen Motiven heraus. Aus reinen Wettbewerbsüberlegungen heraus macht Refabrikation hier keinen Sinn. Diese Feststellung gilt jedoch überwiegend für komplette Funktionseinheiten bzw. Produkte.

Im Kfz-Ersatzteilsektor liegen die Verhältnisse anders – auch bezüglich Common Rail Injektoren:

einerseits teilen Sie das „Schicksal“ aller Automobilersatzteile für noch im Verkehr befindliche Fahrzeugflotten auf einem inzwischen überholten technischen Entwicklungsstand. Für früher produzierte, noch im Markt befindliche Automobilmodelle werden eben auch „technisch rückständige“ Ersatzteile benötigt, die in das jeweilige Fahrzeug

mit seinem altersbedingten Ersatzteilbedarfsfall auch passen, da neuere Ersatzteile in der Regel bauartbedingt nicht abwärtskompatibel sind. Dies spricht somit eindeutig für eine Refabrikationseignung von Common Rail Injektoren, bei denen ja unzweifelhaft ebenfalls ein hohes Innovationstempo herrscht. Zudem sind in späteren Jahren des Fahrzeug-Marktzyklusses die Möglichkeiten zur Neuproduktion des „veralteten“ Injektors eingeschränkt bzw. zumindest teuer, was zusätzlich zugunsten der Refabrikation spricht.

Andererseits bietet gerade die Refabrikation die Möglichkeit, zwischenzeitlichen technischen Fortschritt während des Prozessschrittes Aufarbeitung mit „einzubauen“, d. h. das Refabrikationsprodukt gleichzeitig zu modernisieren. Betroffene Einzelteile aus inzwischen als besonders verschleißträchtig bzw. den auftretenden Beanspruchungen nicht gewachsenen Materialien können durch solche mit verbesserter Haltbarkeit ersetzt werden, zu weiche Oberflächen können zusätzlich nachbeschichtet werden usw. Dies ist bei zahlreichen Refabrikationsprodukten bereits gängige industrielle Praxis. Solche Möglichkeiten dürften sich mittelfristig auch für die Refabrikation von Common Rail Injektoren in geeigneter Weise erschließen bzw. sind bereits gegeben.

Ein Beispiel ist das von einem Injektorhersteller nach einem derzeit noch geheim gehaltenen Verfahren so bezeichnete „DIAMOND-LIKE-COATING“ wichtiger Funkti-

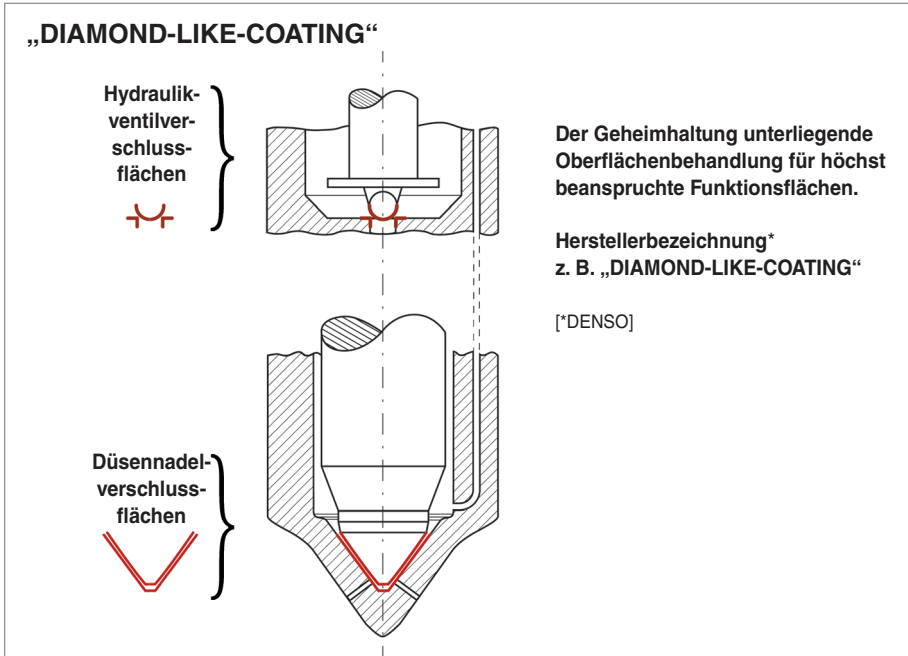


Abbildung 43: „DIAMOND-LIKE-COATING“

onsflächen hochbelasteter Injektorenbauteile. Hier erschließt sich die Möglichkeit des Ersatzes der betreffenden herkömmlichen Bauteile durch beschichtete Bauteile, oder das Nachbeschichten durch den mit dem Refabrikationsunternehmen kooperierenden Hersteller mit seinem geheim gehaltenen Verfahren, wenn er im Interesse der Kundenzufriedenheit zur Verfügbarkeit erswinglicher Austausch-Injektoren beitragen möchte. Die betroffenen Bauteile bei diesem Beispiel zeigt Abbildung 43.

Insgesamt sprechen auch die erläuterten Zusammenhänge zu Innovations- und Modernisierungskriterien klar zugunsten der Refabrikation von Injektoren.

## 5.6 Weitere Kriterien

In [STE93] und [RIE12] werden als weitere (bzw. dort „sonstige“) Evaluierungskriterien noch Produkthaftungsfragen, Einflüsse durch Konfrontation oder Kooperation mit dem Originalhersteller sowie Schutzrechtsfragen genannt. Zu den Produkthaftungsfragen bzw. evtl. Sicherheitsrisiken sind zwischenzeitlich einerseits Veröffentlichungen erschienen, die deutlich machen, dass sich auch für einen Refabrikanten keine neue bzw. gar schwierigere Situation einstellt als für jeden anderen Akteur im Kfz-Service [RIE12]. Zu evtl. Sicherheitsrisiken arbeiten die Verbände der Automobil- und Automobilzulieferindustrie an Bemessungsinstrumentarien, die ebenfalls in [RIE12] beschrieben sind, Abbildung 44.

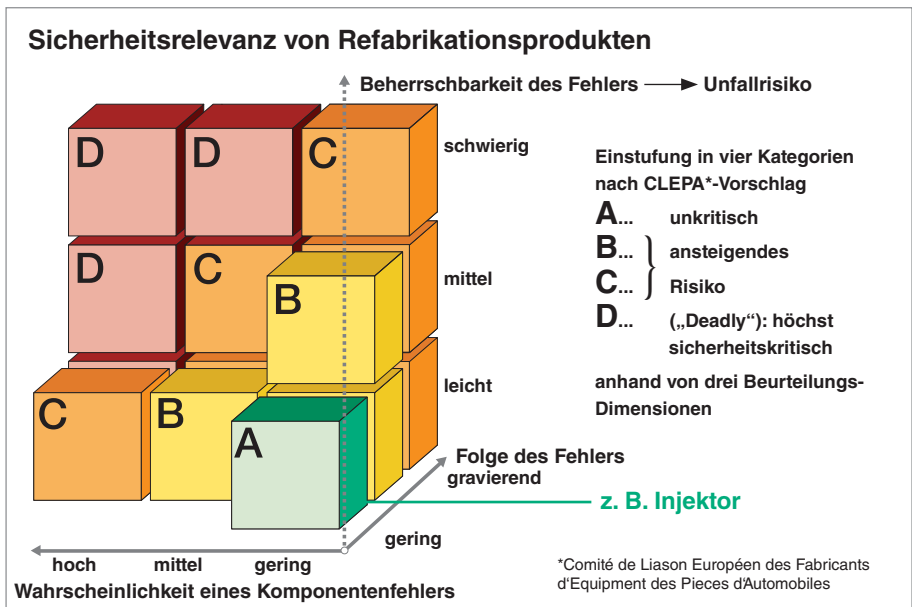


Abbildung 44: Sicherheitsrelevanz von Refabrikationsprodukten

Demnach sind Common Rail Injektoren in der in Abbildung 44 so bezeichneten Kategorie A einzustufen, wonach als größtes anzunehmendes Risiko der Fall gelten muss, dass unterwegs der Motor stottert oder stehen bleibt – ein Risiko, das auch von zahlreichen anderen Motorteilen ausgeht, für deren Refabrikation selbst durch herstellerunabhängige mittelständische Refabrikationsunternehmen keine Einschränkungen zu erwarten sind.

Zudem arbeitet das Unternehmen des Verfassers eng mit den Originalherstellern der Common Rail Injektoren zusammen, bzw. in einigen Marktsegmenten auch in deren Auftrag. Damit erledigen sich auch Fragen der Konfrontation oder Kooperation mit dem Originalhersteller inklusive Schutzrechtsfragen im vorliegenden Thema mit positivem Ausgang.

Insgesamt sprechen somit auch alle in der Literatur beschriebenen weiteren Kriterien für eine Refabrikation von Common Rail Injektoren.

## **5.7 Eigene Kriterien**

Speziell bezogen auf Common Rail Injektoren sollten nach den Untersuchungen für die vorliegende Arbeit noch zwei weitere Kriterienkategorien formuliert und eingeschätzt werden, da deren Bewertungs- bzw. Einschätzungsergebnisse für eine ausgesprochen starke Eignung solcher Komponenten zur Refabrikation sprechen:

### **5.7.1 Kriterien der Verfügbarkeit interkontinental importierter ausgemusterter Injektoren**

Bei den Untersuchungen für die vorliegende Arbeit hat sich der Verfasser – bedingt durch das im Unternehmen refabrizierte Produktspektrum – sehr eingehend und erfolgreich mit Common Rail Injektoren japanischer Hersteller befasst. Für diese Refabrikationsprodukte, die im europäischen Markt vergleichsweise rar, gesucht und teuer sind, gibt es in Indien sowie einigen asiatischen Märkten (vgl. Abbildung 6) dagegen oftmals größere Fahrzeugflotten der jeweiligen Marke und somit „Altteile“ – die Ausgangsprodukte jeder Refabrikation, welche zudem in Asien noch kaum praktiziert wird. Hier kann sich der europäische Refabrikant von Common Rail Injektoren somit vorteilhaft der in den vergangenen Jahren entstandenen weltweiten Kfz-Altteile-Handelsnetze bedienen, um an genügend kostengünstige Ausgangsprodukte heranzukommen. Ein solches Bedienen auch bei Common Rail Injektoren ginge völlig konform mit den globalen Tendenzen bei zahlreichen anderen Kfz-Austauschteilen (z. B. kaufen amerikanische Refabrikationsunternehmen für Austauschteile europäischer Fahrzeugmarken ihre Altteile ebenfalls in Europa ein) und könnte der Refabrikation von Common

Rail Injektoren zu einem zusätzlichen Schub verhelfen.

Nicht konform mit ansonsten geläufig gewordenen Entwicklungen bei anderen Kfz-Ersatzteilen gehen jedoch die Gesetzmäßigkeiten bei Common Rail Injektoren bezüglich der folgenden noch neu definierten Kriterienkategorie:

### **5.7.2 Kriterien des Verdrängungswettbewerbs durch Kfz-Ersatzteile aus dritten Quellen**

Bei herkömmlichen Kfz-Ersatzteilen gibt es auf der Versorgungsseite bzw. auch aus Kundensicht üblicherweise fünf Optionen

- neu hergestellte Originalteile (seitens des Zulieferers der Erstausrüstung)
- neu hergestellte Ersatzteile (seitens kompetenter anderer Zulieferer)
- Austauschteile aus der Refabrikation (seitens Zulieferern und Unabhängigen)
- nachgefertigte Ersatzteile (seitens Unabhängiger inklusive Produktpiraten)
- Gebrauchtteile

Bei Common Rail Injektoren scheiden die beiden letztgenannten Optionen, die Refabrikationsunternehmen ansonsten das Leben inzwischen durchaus schwer machen können, grundsätzlich aus. Common Rail Injektoren sind technologisch zu anspruchsvoll, um von Dritten (inkl. sog. Produktpiraten) nachgefertigt werden zu können. Sie lassen sich auch nicht einfach als Gebrauchtteile in einem Fahrzeug einbauen wie etwa ein gebrauchter Kotflügel statt eines unfallbeschädigten: Common Rail Injektoren müssen über zahlreiche (in Kapitel 8 noch zu besprechende Parameter) elektronisch in ein Fahrzeug-Gesamtsystem eingelernt bzw. angepasst werden. Dies ist weder dem Do-it-yourself Reparateur noch einem ansonsten durchaus sachkundigen Kfz-Service-Betrieb möglich, da die Parameter eines gebrauchten Injektors unbekannt sind – sonst funktioniert ein Dieselmotor schlechter als vorher bzw. läuft überhaupt nicht.

Common Rail Injektoren nehmen somit in dem nach den hier angesprochenen Kriterien betrachteten Marktgefüge eine klare Sonderstellung ein, die Abbildung 45 illustriert.

Somit erhöht sich die Eignung von Common Rail Injektoren zur Refabrikation aufgrund des Wegfalls zweier anderer Optionen noch zusätzlich signifikant.

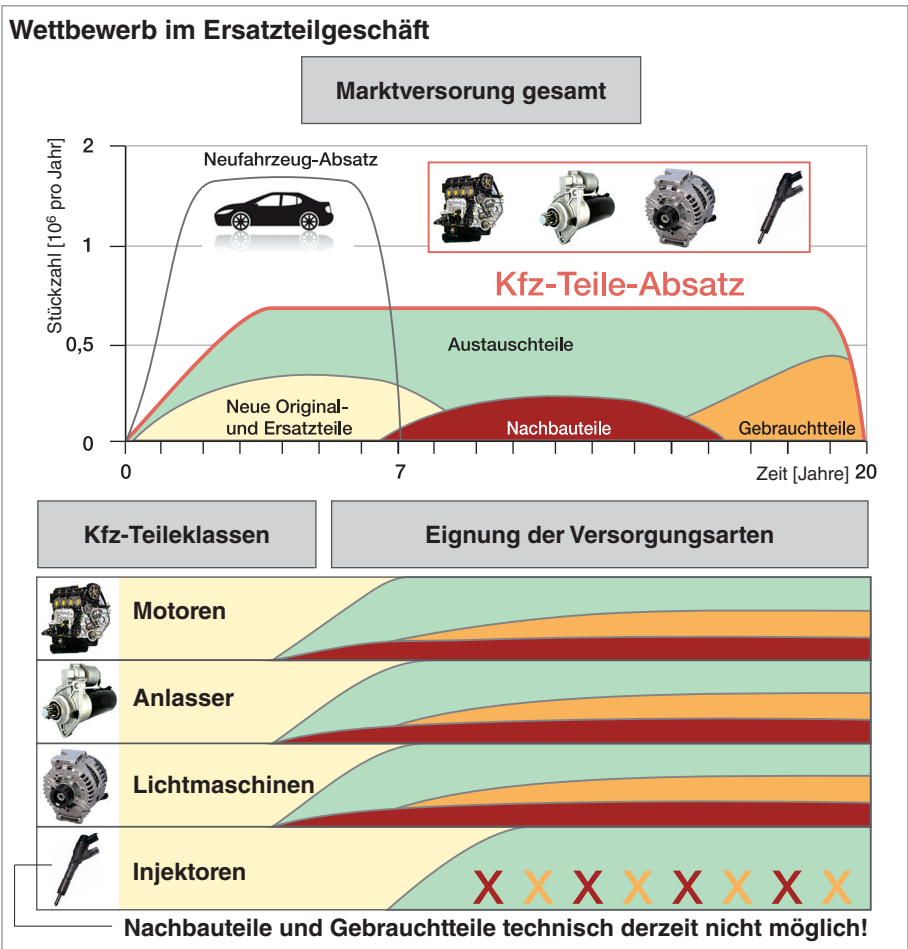


Abbildung 45: Wettbewerb im Ersatzteilgeschäft,  
Illustrationsquellen: Fotolia und Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Kfz-Teile)

### 5.8 Zusammenfassende Einstufung

Verglichen mit klassischen sowie mit in jüngerer Zeit neu hinzugestoßenen Refabrikationsprodukten für den Kfz-Ersatzteilemarkt, z. B. Kupplungen, Motoren, Getriebe, Anlasser und Lichtmaschinen, Turbolader im Antriebsstrang, oder Lenkungen und Bremsen im Fahrwerk, präsentieren sich Common Rail Injektoren als ausgesprochen geeignet für die Refabrikation bzw. aussichtsreich für ein zugehöriges Geschäftsfeld.

Sie bergen jedoch auch signifikante neue anspruchsvolle Herausforderungen – sowohl hinsichtlich des technologischen Niveaus der Refabrikation hinsichtlich Präzision



Das Sortiment zu refabrizierender Injektoren sowie auch Hochdruckpumpen ist bereits im derzeitigen Fahrzeugmarkt äußerst umfangreich, Abbildungen 47.

Ein weiteres Wachstum ist vorgezeichnet.

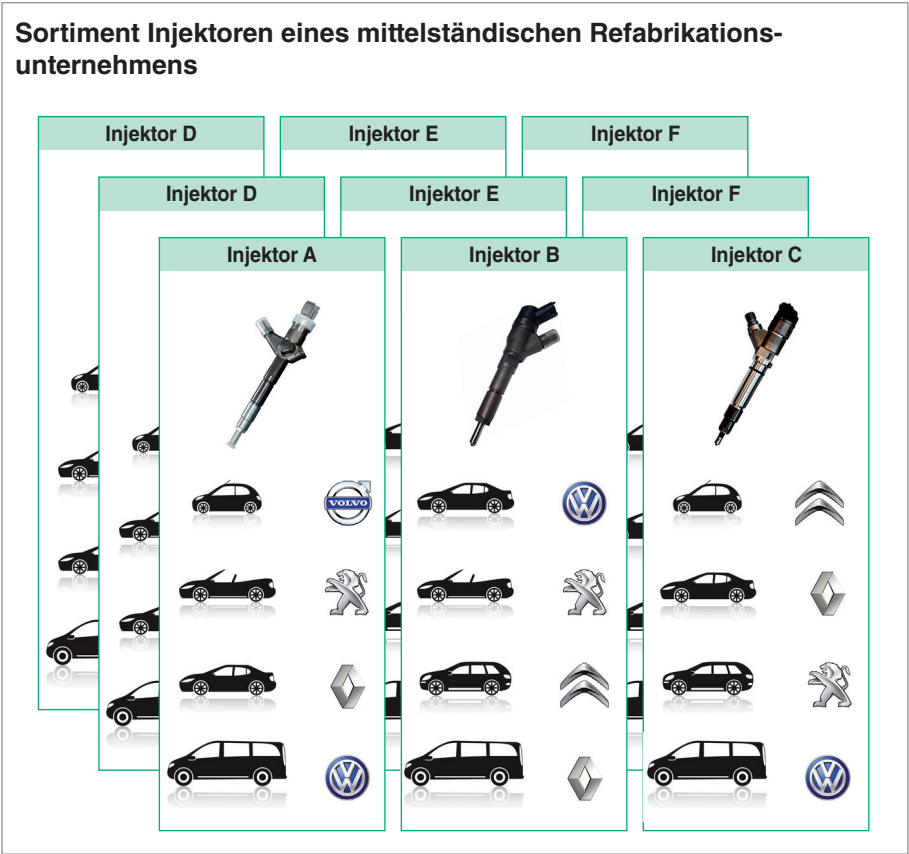


Abbildung 47: Sortiment Injektoren eines mittelständischen Refabrikationsunternehmens, Bildquellen: Fotolia und Schmitz + Krieger GmbH, Köln



## **6. Entwicklung der Refabrikationsprozessschritte zur Teilegewinnung**

Die Ausführungen dieses und der kommenden drei Kapitel folgen der im Unterabschnitt 3.2.3 „Optimierungsmethoden“ bereits als empfehlenswert genannten und dort in Abbildung 20 illustrierten Gliederung in drei Refabrikations-Leistungsbereiche Teilegewinnung (Kapitel 6), Teilebereitstellung (Kapitel 7) und Erzeugnismontage (Kapitel 8) und sind inhaltlich jeweils nach demselben Ordnungsprinzip aufgebaut.

### **6.1 Abfolge der Prozessschritte**

Die physikalische, d. h. im Refabrikationsunternehmen auch als Materialfluss-Stationen sichtbare Abfolge der Prozessschritte zur Teilegewinnung sind die drei Stationen Demontage, Reinigung und Prüfung.

Hinzu kommt, wie in Unterabschnitt 3.2.2 und dort in Abbildung 19 gezeigt, bei mechanischen Refabrikationsprodukten, zu denen Common Rail Injektoren gehören, eine Eingangsprüfung vor der Demontage. Mithin sind nach anerkannter Lehrbuchmeinung im vorliegenden Kapitel vier Prozessschritte zu definieren und auszuarbeiten. Bedingt durch die konstruktiven und funktionellen Besonderheiten von Common Rail Injektoren wurde es zur Erreichung der in dieser Arbeit gesteckten Ziele jedoch erforderlich, die lehrbuchmäßige Reihenfolge und Inhalte dieser vier Prozessschritte dort zu modifizieren und zu variieren, wo dies für den Refabrikationserfolg beim Stand der Technik unabdingbar ist. Dies betrifft einerseits den Prozessschritt Reinigung, der am Common Rail Injektoren-„Innenleben“ (aufgrund der dann applizierbaren hohen Drücke) vorzugsweise im noch undemontierten Zustand der Injektoren anzusiedeln ist. Andererseits betrifft dies den Prozessschritt Prüfung und Sortierung: Wie bereits im Abschnitt 3.4 dargestellt, wird die Prüfung bzw. Messung einiger funktionell entscheidender geometrischer Eigenschaften der Injektoren selbst in deren Neufertigung noch nicht technisch/wirtschaftlich zufriedenstellend beherrscht. Dieser Umstand belastet bzw. verhindert somit auch die Aufgaben der Prüfung und Sortierung von Injektoren-Bauteilen in der Refabrikation. Ersatzweise wurden daher als Erfolgsfaktor zur Zielerreichung der hier vorgelegten Arbeit Ergebnisse aus der Funktions-Eingangsprüfung sowie Funktions-Endprüfung (im Falle von Rückläufern aufgrund von Beanstandungen) für den Prozessschritt Prüfung und Sortierung herangezogen und so interpretiert, dass sie diesen mit tragen. Somit wurde für die mit der vorgelegten Arbeit verwirklichte Technologieentwicklung auch eine neue, die Lehrbuchmeinung ergänzende neue Reihenfolge von Prozessschritten in der Teilegewinnung entwickelt.

Zusätzlich entwickelt wurde auch noch ein weiteres – materialflusstechnisch unsichtbares, aber informationsflusstechnisch bedeutsames – vorgelagertes Element im Prozessschritt Eingangsprüfung: nämlich die Dokumentation der bei der Entscheidung

zum Injektorausbau und -austausch in der Kfz-Werkstatt ausschlaggebenden Informationen, da diese für den Refabrikationsprozess ausgesprochen wertvoll sind bzw. wären.

Diese also noch nicht den Stand der Technik repräsentierende Abfolge von vier Prozessschritten zur Teilengewinnung zeigt Abbildung 48 mit „Soll-/Ist“-Einstufungen; sie wird im Unternehmen des Verfassers durch Angliederung einer Kfz-Werkstatt zur weiteren Erkenntnisgewinnung derzeit realisiert.

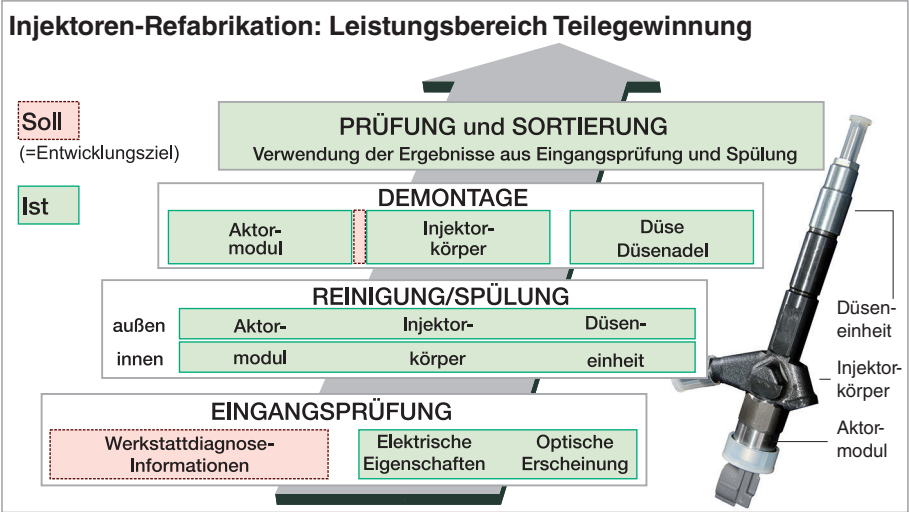


Abbildung 48: Injektoren-Refabrikation: Leistungsbereich Teilengewinnung.  
Illustrationsquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Injektor)

## 6.2 Refabrikationsumgebung

Die Präzision und Filigranität der konstruktiven Elemente von Common Rail Injektoren erfordert es, bei der Refabrikationsumgebung der technischen Sauberkeit von Arbeitsplatz, Betriebsmitteln und Hilfsmitteln allerhöchste Aufmerksamkeit zu schenken.

Angesichts der in die Injektoren eingebrachten funktionsrelevanten Bohrungen in engsten Durchmesserbereichen bis herab zu 0,01 mm sowie der eng tolerierten beweglichen Bauteile mit Spielpassungen bis herab zu 2 µm Toleranz muss sichergestellt sein, dass keinerlei unerwünschte Partikel Bohrungen verstopfen oder Bewegungen hemmen. Aus diesen Gründen wird es hiermit als erforderlich definiert, den Refabrikationsprozess zumindest in Sauberräumen der Reinraumklasse 3 nach ISO 14644 –1 durchzuführen, Abbildung 49.

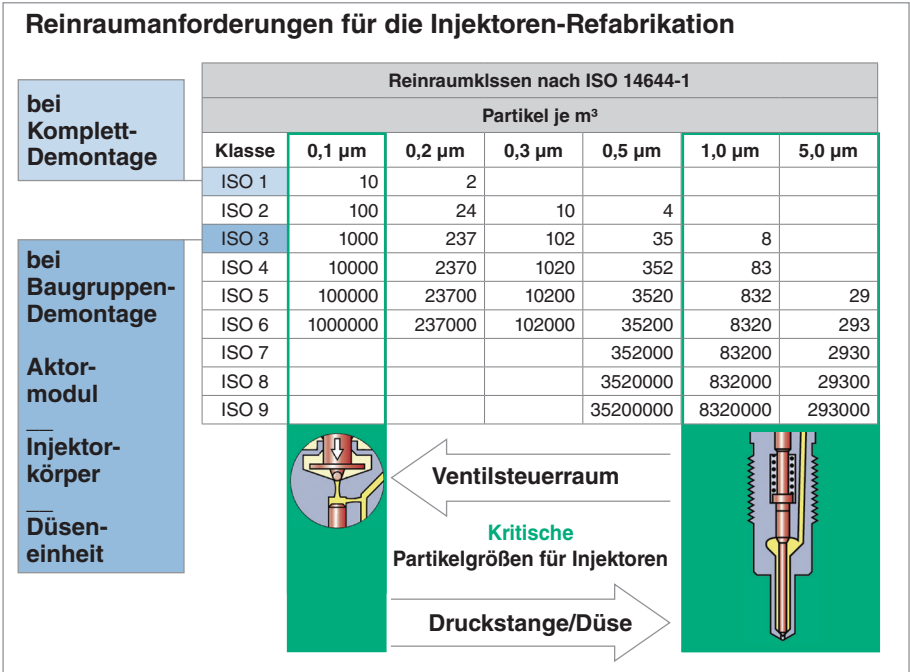


Abbildung 49: Reinraumanforderungen für die Injektoren-Refabrikation,  
Illustrationsquellen: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel

6.3 Beitrag zum Refabrikationserfolg

Der Beitrag insbesondere des Prozessschrittes Demontage zum (technischen und wirtschaftlichen) Refabrikationserfolg wird, da es sich bei der Demontage naturgemäß um den schmutzigsten Teil des gesamten Geschehens handelt, vielfach fälschlicherweise stark unterschätzt.

Wenn in der Teilegewinnung zu geringschätzig mit den verschmutzten Produkten umgegangen wird, werden viele Beschädigungen, die nachher zur Nichtwiederverwendbarkeit einzelne Teile führen, häufig erst bei der Demontage den Produkten zugefügt. Hierin besteht also aus technischer Sicht ein sehr bedeutender Beitrag der Demontage zum Refabrikationserfolg.

Andererseits verdienen aus wirtschaftlicher Sicht die demontierten Teile bereits bei deren Demontage ein besonderes Augenmerk im Sinne einer sehr sorgfältigen Früherkennung von Defekten, die eine weitere Behandlung bestimmter Teile durch aufwändige Reinigungs- und Prüfschritte von vornherein nicht mehr angezeigt erscheinen las-

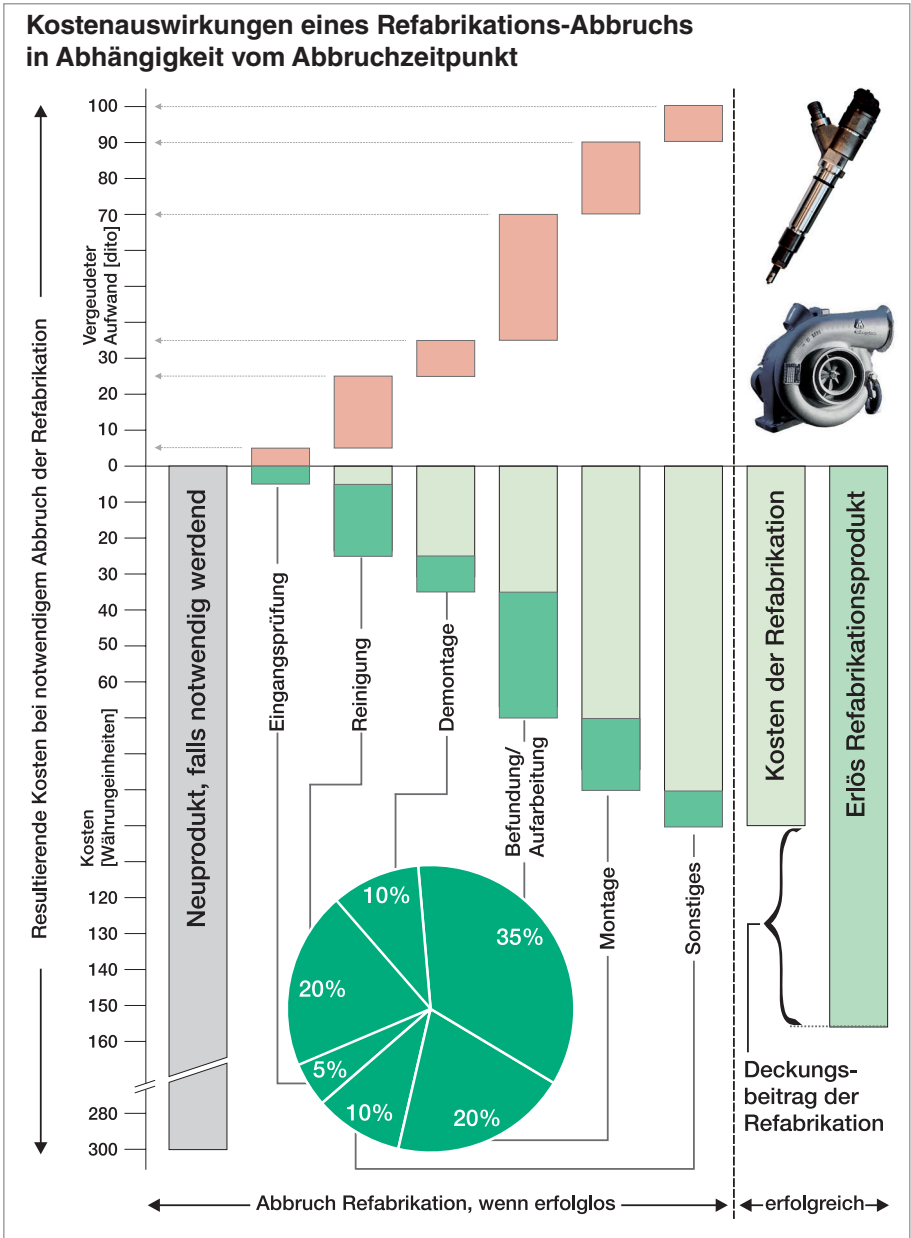


Abbildung 50: Kostenauswirkungen eines Refabrikations-Abbruchs in Abhängigkeit vom Abbruchzeitpunkt, Illustrationsquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Injektor, Turbolader)

sen, um keine unnötigen weiteren wirtschaftlichen Aufwendungen zu verursachen. Je früher ein Teil als nicht mehr wiederverwendungs- oder nacharbeitsfähig ausgesondert werden kann, umso weniger Kosten werden für den gesamten Refabrikationsprozess vergeudet, Abbildung 50.

Wie aus Abbildung 50 maßstäblich ersichtlich, ist der vergeudete Aufwand einer zum Ende des letzten Prozessschrittes erfolglos abgebrochenen Refabrikation größer als der mit erfolgreicher Refabrikation erzielbare Deckungsbeitrag. Solche späten Abbrüche sollten also die Ausnahme darstellen.

Hier besteht also aus wirtschaftlicher Sicht ein sehr bedeutender Beitrag der Demontage zum Refabrikationserfolg.

Mit diesem Bewusstsein werden die nachfolgend beschriebenen Prozessschritte im Refabrikations-Leistungsbereich Teilegewinnung ausgearbeitet.

## 6.4 Entwicklung der Prozessschritte

In über zwei Jahre lang durchgeführten experimentellen Untersuchungen, Messreihen und zugehörig erstellten Erfolgsstatistiken wurden in intensiver Zusammenarbeit mit Originalherstellern die im Folgenden beschriebenen Prozessschritte für eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Teilegewinnung für die Injektoren-Refabrikation entwickelt. Abbildung 51 zeigt den Aufbau des für die im vorliegenden Kapitel und den beiden folgenden dann präsentierten Technologieentwicklungen herangezogenen Beispiel-Injektors im Überblick; die anschließenden Unterabschnitte erläutern und illustrieren die Prozessschritte in einem Detaillierungsgrad, dass keine Betriebsgeheimnisse der Hersteller verletzt werden. Hierbei folgt die Reihenfolge der Textabschnitte nicht der klassischen chronologischen Refabrikations-Reihenfolge Eingangsprüfung/Demontage/Reinigung/Prüfung und Sortierung; es wurde ja bereits im Abschnitt 6.1 ausgeführt, dass zur erfolgreichen Refabrikation von Common Rail Injektor bestimmte gezielte Modifikationen bzw. Variationen dieser Reihenfolge erforderlich wurden. Auf diese wird in den jeweiligen Textabschnitten dann eingegangen.

## Aufbau des für die präsentierten Technologieentwicklungen herangezogenen Beispiel-Injektors

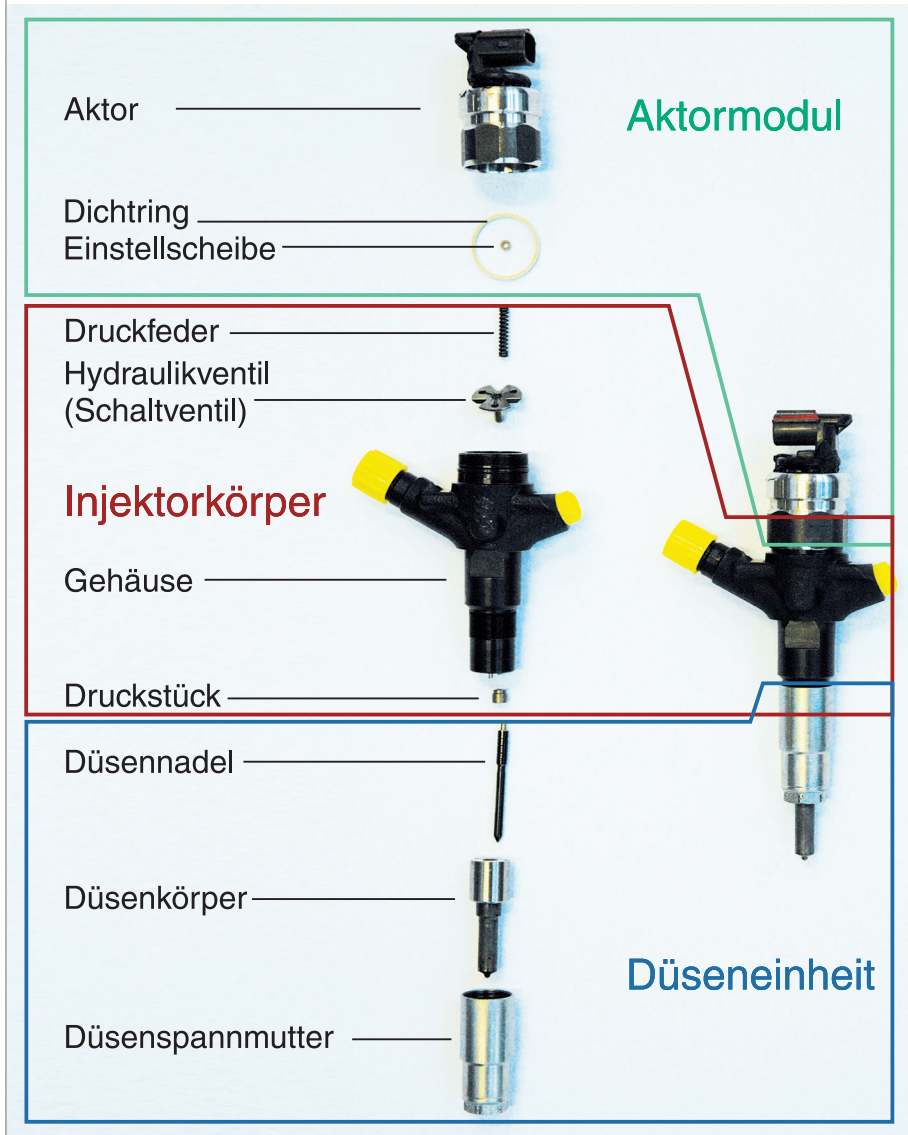


Abbildung 51: Aufbau des für die präsentierten Technologieentwicklungen herangezogenen Beispiel-Injektors, Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

### 6.4.1 Eingangsprüfung

Die erste Eingangsprüfung hat sich visuellen und elektrischen Eigenschaften der angelieferten Injektoren zu widmen: Sofern erforderlich, ist zunächst eine schonende Vorreinigung des unzerlegten Injektors durchzuführen. Sodann ist zu prüfen:

Erscheinungsbild des unzerlegten Injektors: Eine eingehende Sichtprüfung, vorzugsweise unter einer großflächigen Arbeitsplatzlupe und guter Arbeitsplatzbeleuchtung fördert bei klaren Entscheidungs-Grenzmustern in der Regel die wichtigsten äußeren Beschädigungen zutage, die eine Aussortierung von Injektoren oder Baugruppen der Injektoren determinieren. Für diesen Prüfschritt wurden Entscheidungskriterien, Entscheidungsmuster und zugehörige Grenzmuster-Kataloge zu allen äußerlich erkennbaren Beschädigungen ausgearbeitet, wobei die zugehörig aufgebauten Prüf-arbeitsplätze identisch aufgebaut wurden wie die im späteren Kapitel bzw. dortigen Unterabschnitt 7.4.1 Befundung präsentierten Entwicklungen und Installationen. Daher wird die zugehörige Abbildung hier noch zurückgestellt – es gilt die spätere Abbildung 57 entsprechend. Dagegen wird hier die entwickelte elektrische Prüfung noch wie folgt definiert und auch illustriert: Isolationswiderstand bzw. Kurzschluss des unzerlegten Injektors: Sowohl bei Piezo- als auch bei Magnetventil-gesteuerten Injektoren können die jeweiligen Aktorenteile elektrisch durchgeschlagen sein. Dies wird durch Anlegen einer Prüfspannung erkannt, wenn der Isolationswiderstand des Injektors nur noch wenige Ohm (gegenüber dem Sollwiderstand von mindestens zehn Mega-Ohm bei 500 Volt)

#### Elektrische Prüfung vor der Demontage



Abbildung 52: Elektrische Prüfung vor der Demontage,

Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln



beträgt, oder der innere Widerstand nicht innerhalb der festgelegten Grenzen laut den Sollwerten in Abbildung 52 liegt.

Weiterhin sollten bei der Eingangsprüfung die – sofern verfügbar – seitens der ausbauenden Kfz-Werkstatt gelieferten Informationen (vgl. Abbildung 32 im Unterabschnitt 4.2.1) ausgewertet werden, die zwar meist nur geringen Einfluss auf den Refabrikationsprozess ausüben – dieser ist weitestgehend standardisiert –, die aber Rückschlüsse auf Erfolgswahrscheinlichkeit der Refabrikation, Lieferantenqualität und einiges mehr ermöglichen.

### 6.4.2 Injektorenreinigung und -spülung

Zur Befreiung des Injektors von möglichen Rückständen jeder Art ist ein gründlicher und ausgedehnter Spülvorgang mit einem spezifizierten Spülöl bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius und mit einer Dauer von fünfzehn Minuten der nächste Schritt in der Teilegewinnung für Common Rail Injektoren, Abbildung 53.

Abbildung 53 zeigt die entwickelte Spülstation. Im Verlauf des Spülvorgangs bessert sich das – bei entsprechender Ausstattung der Spülstation – mit aufgezeichnete Spritzbild aus den Düsenlöchern vielfach ganz erheblich, da Verkrustungen gelöst werden.

Wenn die Injektoren ohnehin schon auf einer solchen Spülstation montiert sind, empfiehlt es sich, die Installation auch gleich noch für einen weiteren vorgezogenen Funktionsprüfungs-Prozessschritt zu nutzen. Hierzu verschließt man den Spülkreislauf,



Abbildung 53: Injektorenreinigung und Prüfung vor der Demontage,  
Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln



## Rücklaufmengenmessung vor der Demontage



Abbildung 54: Rücklaufmengenmessung vor der Demontage,

Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

beaufschlagt die Injektoren für fünf Minuten mit einem Systemdruck von 300 bar und misst die Sollwerteinhaltung der Rücklaufmengen, Abbildung 54.

### 6.4.3 Demontage

Nach Abschluss der beschriebenen visuellen und elektrischen Prüfung und der definierten Reinigungszyklen kann die Demontage des Injektors erfolgen. Hierfür bringen Injektoren – im Gegensatz zur Situation bei zahlreichen anderen Refabrikationsprodukten – zunächst einmal vorteilhafte Voraussetzungen mit: Verrostete oder aufgrund Korrosion durch Streusalzeinfluss festsitzende Schraubverbindungen, die beim Lösen abzureißen drohen oder zumindest anderweitige Beschädigungen erleiden, sind bei Injektoren im allgemeinen kein Thema. Auch die Ausführung sowie Vielfalt erforderlicher Demontagewerkzeuge ist vergleichsweise überschaubar, so dass im vorliegenden Abschnitt auf eine detaillierte und illustrierte Darstellung des Prozessschrittes Demontage bewusst verzichtet wird.

Refabrikation erfordert prinzipiell die vollständige Demontage eines Produktes. Hiervon darf nur abgewichen werden, wenn eine vollständige Demontage sinnwidrig wäre, weil sie die gegebene Funktionalität einer Komponente unnötigerweise auflösen würde. Einleuchtendes Beispiel sind elektronische Leiterplatten in Refabrikationsprodukten, wo niemand auf die Idee käme, im Sinne einer vollständigen Demontage sämtliche Elektronikbauteile herauszulöten, nur um sie dann später wieder einzufügen/einzulöten.

Auf Common Rail Injektoren bezogen, betrifft dieses kritische Bewusstsein zur Sinnfälligkeit einer vollständigen Demontage in der überwiegenden Zahl der Injektorentypen zunächst den Aktormodul; bei bestimmten Injektorentypen auch den Injektorkörper – abhängig in der Regel von der konstruktiv festgelegten Ansiedlung von Drosseln und Ventilen.

Diese können, falls defekt, aufgrund ihrer Filigranität ohnehin nicht aufgearbeitet werden – somit wäre Ihre Demontage nutzlos. Falls intakt, belässt man diese sensiblen feingliedrigen Systeme also besser undemontiert.

Hinzu kommt ein beim Stand der Refabrikationstechnik in hohem Maße kritischer Umstand: Eine Demontage des Injektors dahingehend, dass Aktormodul und Injektor zur Refabrikation auseinandergeschraubt, d. h. voneinander gelöst werden, macht den seitens des Neuherstellers auf 1 µm (!) eingestellten Abstand zwischen den zugehörigen Teilen zunichte, welcher für die sehr kurze Ansprechzeit des Einspritzvorgangs notwendig ist.

Ein solcher Demontageschritt darf allenfalls geschehen, wenn der genannte Abstand bei der Refabrikation im Zuge des Prozessschritts Injektorenmontage wieder eingestellt werden kann (siehe hierzu auch Unterabschnitte 7.5.5 und 8.4.1) was durchaus in den Kontext der in der vorliegenden Arbeit verfolgten Technologieentwicklung zur Refabrikation gehört, da es beim etablierten Stand der Refabrikationstechnik noch nicht verwirklicht werden konnte.

Zu demontieren sind jedoch bei jedem Injektor die durch den Fahrbetrieb regelmäßig am stärksten in Mitleidenschaft gezogenen, ganz überwiegend für die Erfordernisse einer Refabrikation ursächlichen Düseneinheiten.

Als Demontageumfang wird somit an dieser Stelle festgeschrieben: Demontage des Düsenkörpers durch Lösen der Überwurfmutter und Herausnehmen der Düsennadel und Fixierstifte (letztere orientieren die Ausrichtung der Düse und damit der Einspritzstrahlen im Brennraum des Motors). Im Zuge dieses Demontagevorgangs kommen bei der in Abbildung 51 gezeigten Injektorenbauart auch Feder und Kleinteile frei. Beurteilbarkeit und Beschaffenheit demontierter Teile in Bezug auf Wiederverwendbarkeit sind sowohl im nachfolgenden Prozessschritt Prüfung und Sortierung als auch im Prozessschritt Erzeugnismontage von entscheidender Bedeutung.

Daran anschließend erfolgt deshalb eine weitere Feinreinigung der Düsenteile in einem Ultraschallbad mit einer Medientemperatur von 40 Grad Celsius und fünfundzwanzig Minuten Dauer, Abbildung 55.

Um evtl. herausgespülte Fremdkörper und Verunreinigungen nicht in die nächste zu reinigenden Düse zu verschleppen, wird das Spülöl nicht mehrmals verwendet.

## Ultraschallreinigung der Injektoren-Einzelteile mit dreistufiger Reinheitskaskade des Reinigungsmediums (Prüföf)



Abbildung 55: Ultraschallreinigung der Injektoren-Einzelteile mit dreistufiger Reinheitskaskade des Reinigungsmediums (Prüföf), Bildquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

### 6.4.4 Prüfung und Sortierung

Wie bereits in den Abschnitten 3.4 sowie 6.1 angesprochen, sind der messtechnischen Überprüfung funktionsentscheidender geometrischer Kennwerte wichtiger Einzelteile von demontierten Common Rail Injektoren beim Stand der Messtechnik einschneidende Grenzen gesetzt, die bezüglich der Refabrikation primär betriebswirtschaftlicher Natur sind: Potentiell verfügbare Messtechniken wie optische 3D-Koordinatenmessung von Maßtoleranzen oder Laser-Interferometrie für Oberflächenbeschaffenheiten sind in einem mittelständischen Refabrikationsunternehmen nicht wirtschaftlich einsetzbar.

Glücklicherweise lassen sich derartige Beschränkungen des eigenen unternehmerischen Tuns jedoch durch intelligenten Zugriff auf die Erkenntnisse aus anderen Refabrikations-Prozessschritten in einem bemerkenswerten Umfang kompensieren: Der Refabrikationsprozessschritt Prüfung sollte daher intensiv die Resultate sowohl der Eingangsfunktionsprüfung und Reinigung vor der Demontage als auch der Funk-

tions-Endprüfung nach der Montage (für dort abgewiesene Rückläufer) heranziehen und bezüglich der nicht direkt messbaren Kennwerte interpretieren: So liefert die bereits im Unterabschnitt 6.4.2 beschriebene Spül- und Funktionsprüfanlage wichtige Resultate, aus der sich Rückschlüsse auf die geometrische Beschaffenheit funktionsentscheidender Einzelteile des jeweiligen Injektors ziehen lassen: In Ergänzung zu den dort bereits beschriebenem Spül- und Prüfzyklus kann die Anlage, Abbildung 54, auch zu einem Messzyklus genutzt werden, bei dem nach dem Spüllauf der Injektoren diese fünf Minuten lang mit 300 bar Druck und Einspritzdauern von 1000  $\mu$ sec weiter betrieben werden. Hierbei wird die Rücklaufmenge pro Injektor gemessen. Beträgt die Rücklaufmenge mehr als fünfzehn Kubikzentimeter pro Minute, lässt dies auf verschlissene bewegliche Teile im Injektor schließen, die nicht wiederverwendet (und auch nicht aufgearbeitet) werden können.

Als weiterer wesentlicher Prozessbestandteil der Prüfung und Sortierung, chronologisch regelrecht auf die Demontage und Reinigung folgend, ist darüber hinaus die sorgfältige visuelle Prüfung aller demontierten Injektoren-Bauteile, anhand aufwendig ausgearbeiteter Grenzmuster, für die Refabrikation in geeigneter Weise auszugestalten:

Der Prozessschritt Prüfung und Sortierung wird einerseits in der Literatur [STE88] noch dem Refabrikations-Leistungsbereich Teilengewinnung zugerechnet – andererseits ist seine Aufgabe, die Bauteile der Injektoren in dreierlei Zustandsklassen:

- direkt wiederverwendbar
- nach Aufarbeitung wiederverwendbar
- nicht wiederverwendbar/ durch Neuteile zu ersetzen

einzuteilen, bei Injektoren auch ein besonders wesentliches Element des Refabrikations-Leistungsbereichs Teilebereitstellung. Dies soll daher in der vorliegenden Arbeit entsprechend im nun folgenden Kapitel, und dort im Unterabschnitt 7.4.1 Befundung, nochmals vertieft werden.

## 7. Entwicklung der Refabrikationsprozessschritte zur Teilebereitstellung

Der Leistungsbereich Teilebereitstellung hat die Aufgabe, die für die nachfolgende Injektorenmontage bzw. den zugrundeliegenden Refabrikationsauftrag richtigen Mengen an

- direkt wiederverwendbaren Komponenten/Bauteilen
- nach Aufarbeitung wiederverwendbaren Komponenten/Bauteilen
- neuen Komponenten/Bauteilen (für als nicht wiederverwendbar befundene)

zu kommissionieren und bereitzustellen.

Ist die Refabrikations-Stückzahl eines bestimmten Injektortyps klein (im Extremfall bis hinunter zu Losgröße eins), fällt diese Aufgabe vergleichsweise leicht. Allerdings bietet dies dann naturgemäß nur eine bescheidene Geschäftsgrundlage.

Ist die Refabrikations-Stückzahl eines bestimmten Injektortyps groß, wachsen die Anforderungen an eine termin- und mengengerechte Disposition von neuen Komponenten/Bauteilen für nicht wiederverwendbar befundene, damit der zugrundeliegende Refabrikationsauftrag termingerecht und im Kostenrahmen erfüllt werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass der Prozentsatz nicht wiederverwendbarer Komponenten/Bauteile je nach eingelieferter Injektoren-Charge stark schwankt. Im Gegenzug zu dieser Herausforderung wachsen bei nennenswerten Refabrikations-Stückzahlen pro Injektortyp aber auch die Potentiale und Chancen, durch zwei besondere organisatorische Maßnahmen die Terminsituation und Kostensituation in der Refabrikation erheblich zu verbessern bzw. zu entlasten.

Bei diesen besonderen organisatorischen Maßnahmen handelt es sich einerseits um die bereits 1988 in [STE88] beschriebene gezielte Variation des Verhältnisses demontierter zu montierter Produkte (dort als  $V_{D/M}$  definiert) mit dem Ziel, vermehrt wiederverwendbare Komponenten und Bauteile aus einer Eingangsmenge zu refabrizierenden Produkten zu gewinnen, die größer ist als die für den jeweiligen Refabrikationsauftrag erforderliche Ausgangsmenge. Dies senkt Kosten.

Andererseits wurde 2012 in [HAU11] das für die Refabrikation neue Prinzip des „Assembly to Order“ (ATO) beschrieben, mit dem das Ziel verfolgt wird, einen Refabrikationsauftrag durch Montage der bestellten Menge aus einem Lagerbestand „anonymer“ demontierter, aufgearbeiteter und neuer Komponenten und Bauteile zu erledigen. Dies erleichtert die Disposition.

Beide genannten besonderen organisatorischen Maßnahmen wurden bislang für die Injektoren-Refabrikation noch nirgendwo angedacht oder gar verwirklicht. Um diese in der vorliegenden Arbeit intensiv zu diskutieren und auszuarbeiten, wird daher der

Leistungsbereich Teilebereitstellung hinsichtlich der zu disponierenden Mengen und resultierender Kostenentlastungen im Abschnitt 7.5 detailliert algorithmiert werden. Um eine Übersichtlichkeit zu bewahren, wird der Injektor allerdings nicht in allen Kleinteilen, sondern bezüglich der Disposition seiner drei wichtigsten Hauptbaugruppen: Aktormodul/Injektorkörper/Düseneinheit diskutiert werden.

7.1 Abfolge der Prozessschritte

Streng genommen beinhaltet der Leistungsbereich Teilebereitstellung nur einen fertigungstechnisch geprägten Prozessschritt: die Aufarbeitung von Komponenten und Bauteilen zu deren Wiederverwendung. Wie aus den vorstehenden Ausführungen zum Eingang des Kapitels 7 ersichtlich, sind die organisatorisch geprägten Aufgaben im Leistungsbereich Teilebereitstellung jedoch ungleich umfangreicher und anspruchsvoller, Abbildung 56.

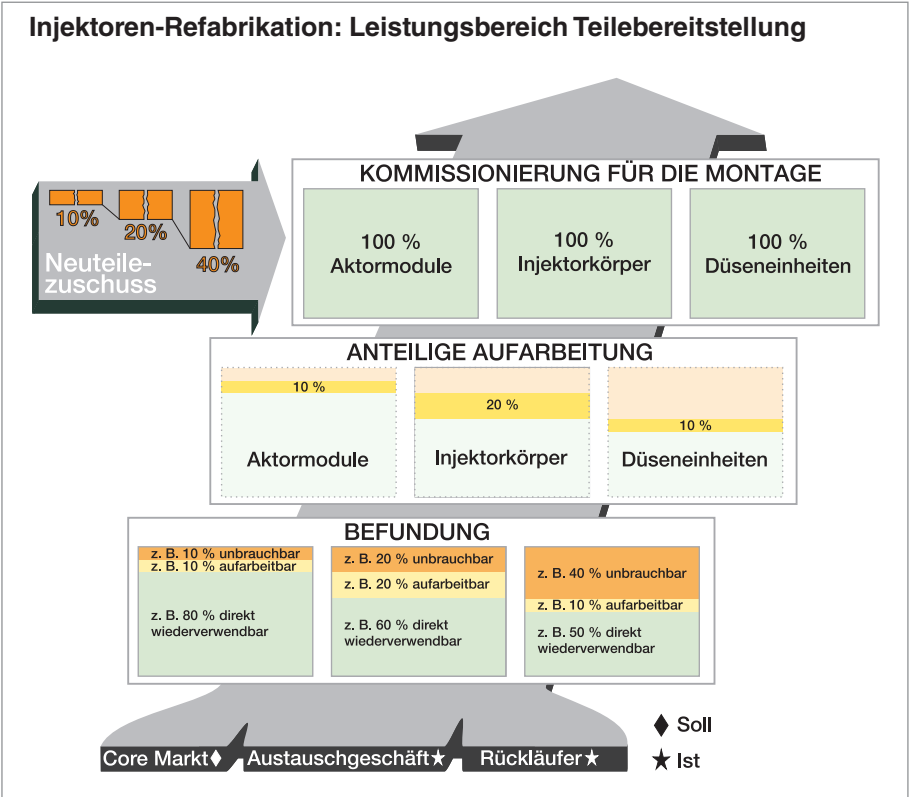


Abbildung 56: Injektoren-Refabrikation: Leistungsbereich Teilebereitstellung

Die Abfolge der Prozessschritte zur Teilebereitstellung umfasst die drei Stationen Befundung, Aufarbeitung und Kommissionierung für die Montage.

Die Teilebereitstellung speist sich aus vielerlei Quellen, von denen die drei erstgenannten sämtlich zuvor (teils mehrfach) die Teilegewinnung durchlaufen haben:

- Teile aus zerlegten Injektoren im Austausch
- Teile aus im Core-Markt zusätzlich erworbenen und zerlegten Injektoren
- Teile aus Injektoren, die bei der Endprüfung nach der Montage zurückgewiesen worden und erneut zerlegt werden mussten (Rückläufer)
- sowie Neuteile

Auch hier präsentiert die Quelle „Core-Markt“ noch nicht bzw. allenfalls in Ansätzen den Stand der Technik und der Märkte, so dass Abbildung 56 die Eingangsmenge der Teilebereitstellung wiederum mit „Soll-/Ist“-Einstufungen zeigt.

## **7.2 Refabrikationsumgebung**

In der Teilebereitstellung ist die technische Sauberkeit von Arbeitsplatz, Betriebsmitteln und Hilfsmitteln im gleich hohen Maß angezeigt wie in der im Abschnitt 6.2 für die Teilegewinnung definierten Spezifikation.

## **7.3 Beitrag zum Refabrikationserfolg**

Der Beitrag insbesondere des Prozessschrittes Befundung zum (technischen und wirtschaftlichen) Refabrikationserfolg ist signifikant: werden zu viele Teile als nicht wieder verwendbar/nichtaufarbeitbar befunden, sind mehr Neuteile erforderlich, um einen Fertigungsauftrag an Refabrikationserzeugnissen abzuarbeiten.

Dies drückt auf das wirtschaftliche Ergebnis bzw. kann die Refabrikation sogar unrentabel werden lassen. Werden dagegen zu wenige Teile als nicht wieder verwendbar/nichtaufarbeitbar befunden, ist also der Prüfer zu großzügig, so wandern zu viele Teile unbefriedigender Qualität in die Erzeugnismontage und Endprüfung.

Sie werden dann entweder schon dort zurückgewiesen und verursachen Nacharbeit, oder sie führen später zu Beanstandungen und Gewährleistungsfällen beim Kunden. Beides verschlechtert gleichfalls das wirtschaftliche Ergebnis der Refabrikation bzw. stellt dieses insgesamt in Frage. Mit diesem Bewusstsein wurden die nachfolgend beschriebenen Prozessschritte der Teilebereitstellung ausgearbeitet.

## 7.4 Entwicklung der Prozessschritte

In über zwei Jahre lang durchgeführten experimentellen Untersuchungen, Messreihen und zugehörig erstellten Erfolgsstatistiken wurden in intensiver Zusammenarbeit mit Originalherstellern die im Folgenden beschriebenen Prozessschritte für eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Teilebereitstellung für die Injektoren-Refabrikation entwickelt. Die anschließenden Unterabschnitte erläutern und illustrieren diese soweit, dass keine Betriebsgeheimnisse der Hersteller verletzt werden.

### 7.4.1 Befundung

Die Befundung widmet sich sämtlichen, im Zuge der Prüfschritte des vorausgegangenen Refabrikations-Leistungsbereichs Teilegewinnung nicht bereits wegsortierten, somit näher zu inspizierenden Injektoren-Bauteilen.

Hierzu wurden umfangreiche visuelle Prüfvorschriften entwickeln, die anhand aufwändig und anschaulich ausgearbeiteter Kriterien und Grenzmuster eine Prüfperson anleiten, nach Befundung die Probanden in die drei Zustandsklassen

- direkt wiederverwendbar
- nach Aufarbeitung wiederverwendbar
- nicht wiederverwendbar/zu ersetzen

einzuteilen.

Einen der im Zuge der vorliegenden Arbeit hierzu zur Einsatzreife gebrachten Arbeitsplätze zeigt Abbildung 57: Eine ausreichend ausgeleuchtete Arbeitsfläche in der entsprechenden Reinraumklasse, mit sequentieller Abspielung zugehöriger Gut-/Schlecht-Grenzmuster auf einem Bildschirm direkt bei der Arbeitsfläche mit dem Probanden, wurde hier zum Mittel der Wahl für die anstehenden Prüf- und Sortieraufgaben. Weitere Schaubilder zu den ausgearbeiteten Grenzmustern enthält der Anhang.

### 7.4.2 Aufarbeitung

Der Aufarbeitung verschlissener oder beschädigter Merkmale von Injektoren-Bauteilen im Zuge deren Refabrikation sind beim Stand der Technik vergleichbar einschneidende Grenzen gesetzt, wie diese schon im Abschnitt 3. 4 sowie im Unterabschnitt 6.4.4 angesprochen wurden: insbesondere geometrische Merkmale, die sich aufgrund ihrer Filigranität beim Stand der Technik nicht einmal (mit vertretbarem Aufwand) messtechnisch erfassen lassen, lassen sich demzufolge selbstverständlich auch nicht aufarbeiten.

Demgegenüber sind gewisse optische Merkmale, z. B. Lackschäden, obwohl funktionell nicht relevant, bei Injektoren ebenso aufarbeitbar wie bei anderen, geläufigen Refabrikationsprodukten. Zugehörige Beschichtungstechniken für den Injektorkörper, Lackier- und Trocknungskabinen sind hier zum Einsatz zu bringen; vergleichbar mit





Abbildung 57: Injektoren-Befundung anhand von Grenzmustern

Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

der industriellen Refabrikationspraxis bei geläufigen Refabrikationsprodukten wie z. B. Anlassern: deren Gehäuse wird im Zuge der Refabrikation gleichfalls schwarz nachlackiert, obwohl funktionell irrelevant, da das Auge des Kunden den Kauf mitentscheidet und nur bei optischer Ebenbürtigkeit das Refabrikationsprodukt gegenüber dem neuen Produkt präferiert.

Weiterhin lassen sich geringfügige Abweichungen der Beschaffenheit von Hochdruckanschluss-Gewinden und Dichtflächen gegenüber dem Sollzustand auch an Injektoren aufarbeiten, sofern die Befundung diese als aufarbeitbar eingestuft hat. Zugehörige Grenzmuster zeigt der Anhang.

### 7.4.3 Kommissionierung für die Montage

Der Prozessschritt „Kommissionierung für die Montage“ erscheint nur auf den ersten Blick als eine vergleichsweise einfach zu erledigende Aufgabe: gilt es demnach doch „nur“, alle direkt wiederverwendbaren Bauteile aus der Befundung sowie die aufge-

arbeiteten Bauteile aus der Aufarbeitung weiter zu schleusen und um so viele neue Bauteile der jeweiligen Art zu ergänzen, wie diese im Zuge der vorausgegangenen Prozessschritte als unbrauchbar aussortiert wurden.

Selbst wenn man die Tatsache berücksichtigt, dass Neuteile Lieferzeiten haben und demzufolge (in zum Bestellzeitpunkt noch unbekannten Prozentsätzen unbrauchbarer Teile) ggf. lange im Voraus des Refabrikationsauftrags (in möglichst dazu passenden Mengen) disponiert werden müssen, erschließt sich die Problematik des Prozessschrittes Kommissionierung noch nicht vollständig. Schließlich ergeben sich im Laufe der Zeit Erfahrungswerte – für einen Refabrikationsauftrag eines Injektortyps, den man bereits kennt, würde man erfahrungsbasiert die entsprechenden Mengen neuer Bauteile plus evtl. Sicherheitszuschläge im Voraus disponieren bzw. bestellen.

Alle diese Überlegungen beziehen sich jedoch auf ein reines Austauschgeschäft mit gleichen Mengen eingelieferter und ausgelieferter Austausch-Injektoren – sie lassen außer Acht, dass Neuteile unverhältnismäßig teuer sind oder gar Lieferschwierigkeiten haben können. Dies kann den Kostenvorteil refabrizierter Injektoren gegenüber neuen Injektoren empfindlich reduzieren oder gar zunichtemachen.

Um diese Gefahr abzuwenden, ist es bei zahlreichen Refabrikationsprodukten im Kfz-Sektor (Motoren, Anlasser, Lichtmaschinen etc. ) inzwischen industrielle Praxis, sich für den notwendigen Ersatz unbrauchbarer Bauteile aus zusätzlich im Core-Markt erworbenen gebrauchten Produkten („Cores“ – z. B. aus Schrottfahrzeugen und Unfallwagen ) zu versorgen, statt gezwungen zu sein, sich teurer Neuteile zu bedienen.

Damit erhält der Prozessschritt „Kommissionierung für die Montage“ eine entscheidende zusätzliche Dimension: nämlich eine zweckentsprechende Disposition zusätzlicher Injektoren-Cores mittels einer aufwands- und kostenoptimalen Berechnung und Bereitstellung der erforderlichen Bauteilmengen der jeweiligen Art, welche aus den zusätzlichen Cores gewonnen werden können.

Diese Art der Kommissionierung von Bauteilen für die Montage ist in der Injektoren-Refabrikation ein Novum. Sie wurde daher für die vorliegende Arbeit entwickelt und soll hinsichtlich der zugrunde gelegten Algorithmen und des daraus gebildeten Optimierungsansatzes im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt werden.

## **7.5 Entwicklung eines dispositiven Optimierungsansatzes zur Senkung von Kosten und Umweltwirkungen seitens der Teilebereitstellung**

### **7.5.1 Dispositive Besonderheiten der Refabrikation**

Charakteristisch für die Mengenflüsse von Produkten, Komponenten und Bauteilen in einer seriellen Refabrikation sind die nachstehenden zwei besonderen Gegebenheiten, die von ihren Pendants in der Neuproduktion grundlegend abweichen

- die Verzweigung und Wiederzusammenführung von Baugruppen- und Bauteilflüssen zu refabrizierten Produkten; im Gegensatz zur Nur-Zusammenführung von Bauteil- zu Baugruppenflüssen zu neuen Produkten
- die hinsichtlich spezifischer Mengen und zugehöriger Kosten heterogene Zusammensetzung von Baugruppen- und Bauteilflüssen aus unbrauchbaren, also zu erneuernden Baugruppen und Bauteilen/nach Aufarbeitung wiederverwendbaren Bauteilen/direkt wiederverwendbaren Baugruppen und Bauteilen im Gegensatz zur homogen aus Neuteilen bestehenden Zusammensetzung neuer Produkte.

Bei der letztgenannten Besonderheit sorgt noch zweierlei für weitere Komplikationen: Einerseits die für jede Baugruppenart bzw. jede Bauteilart unterschiedliche Zusammensetzung aus erneuerten/aufgearbeiteten bzw. direkt wiederverwendbaren Einheiten; determiniert durch deren Zustände aufgrund unterschiedlicher Beanspruchungsarten und Verschleißverhalten. Andererseits schwankt diese Zusammensetzung auch noch innerhalb der Baugruppen- bzw. Bauteilarten von Refabrikationsauftrag zu Refabrikationsauftrag, determiniert durch die qualitative Zusammensetzung der eingelieferten Charge zu refabrizierenden Produkte.

Die beschriebenen beiden Besonderheiten der Refabrikation bringen es mit sich, dass die für einen Refabrikationsauftrag zu disponierenden neuen Baugruppen und Bauteile (für als unbrauchbar befundene) sowie die Kapazitäten für aufzuarbeitende Bauteile nicht vorausplanbar sind, sondern erst im Verlaufe der Refabrikation bekannt werden und besonders viel Flexibilität bzw. gerade auch neue Lösungsansätze erfordern. Diese sollen im vorliegenden Abschnitt des Kapitels mit dem Fokus einer Optimierung von Kosten und Umweltwirkungen seitens der Teilebereitstellung entwickelt werden.

## 7.5.2 Begriffliche Festlegungen zum dispositiven Optimierungsansatz

Im Interesse einer weitgehenden Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit auch auf andere Refabrikationsprodukte wird im vorliegenden Abschnitt

- allgemein von *Baugruppen* und/oder *Bauteilen* eines (Refabrikations-)Produktes gesprochen, wenn es um die Herleitung grundlegender Zusammenhänge geht,
- dort, wo es um die Anwendung auf das hier behandelte Thema der Refabrikation von Einspritzsystemen geht, wird speziell von *Komponenten* (eines Injektors) gesprochen, wobei als die drei Hauptkomponenten eines Injektors, wie bereits in vorausgegangenen Kapiteln und Abschnitten,
  - Aktormodul
  - Injektorkörper
  - Düseneinheit,

zur Visualisierung bzw. Verifizierung der erarbeiteten Aussagen und gewonnenen Erkenntnisse herangezogen werden.

## 7.5.3 Quantifizierung der Baugruppen- und Bauteilflüsse bei identischen Mengen eingelieferter und ausgelieferter Refabrikationsprodukte

Gliedert man die Refabrikation, wie zuvor ab Kapitel 6 bereits praktiziert, in die drei aufeinander folgenden Bereiche

- Teilengewinnung
- Teilebereitstellung
- Wiedermontage

so ergeben sich in der Teilengewinnung bei gleicher Anzahl eingelieferter und ausgelieferter Refabrikationsprodukte die in Abbildung 58 dargestellten Mengenflüsse und die sie bestimmenden nachstehend quantifizierten Größen:

Ausgangsgrößen:

$R_{am}$  = Refabrikationsauftragsmenge  
(hier noch gleich der Menge eingelieferter und auszuliefernder Produkte)

$B_a$  = Bauteileanzahl pro Produkt,  
unterteilt in

$Wb$  = Anzahl Wertbauteile  
(möglichst wieder zu verwendende)

$Kt$  = Anzahl Kleinteile  
(grundsätzlich auszusondernde, wie Dichtungen, Etiketten, Schutzkappen etc.)

Abbildung 58 zeigt hierzu eine auf Injektoren angewandte, zur Übersichtlichkeit vereinfachte Darstellung mit  $Ram = 60$  Injektoren;  $Wb = 3$  Komponenten (Aktormodul, Injektorkörper, Düseneinheit) sowie  $Kt = 2$  Elemente (Schutzkappen).

Definiert man

$Bm$  = Bauteilmenge, so ist die gesamte Bauteilmenge zu Beginn des Refabrikationsprozesses

$$Bm = Ram * Ba$$

Im Weiteren berechnen sich die Bauteilmengen der Teilegewinnung eindeutig und bereits vor Beginn einer Refabrikation im Voraus wie folgt:

$$Bm_D = Ram * (Wb + Kt) \quad = \text{Bauteilmenge zur Demontage}$$

$$Bm_R = Ram * Wb \quad = \text{Bauteilmenge zur Reinigung}$$

$$Bm_P = Ram * Wb \quad = \text{Bauteilmenge zur Prüfung}$$

Nicht im Voraus lassen sich dagegen die Bauteilmengen berechnen, die die anschließende Teilebereitstellung hervorbringt:

Verwendet man

$$P_u = \text{Prozentsatz unbrauchbarer Bauteile}$$

$$P_a = \text{Prozentsatz aufarbeitbarer Bauteile}$$

$$P_d = \text{Prozentsatz direkt wiederverwendbarer Bauteile,}$$

jeweils als Dezimalwerte, so errechnen sich mit den bereits eingeführten Größen die Bauteilmengen der Teilebereitstellung jeweils pro Bauteil der lfd. Nr. 1 bis n mit

$$Bm_{u(n)} = P_{u(n)} * Ram = \text{Menge unbrauchbarer Bauteile der lfd. Nr. n}$$

Diese Menge ist hier noch gleich

$$Bm_{e(n)} = \text{Menge zu erneuernder Bauteile der lfd. Nr. n.}$$

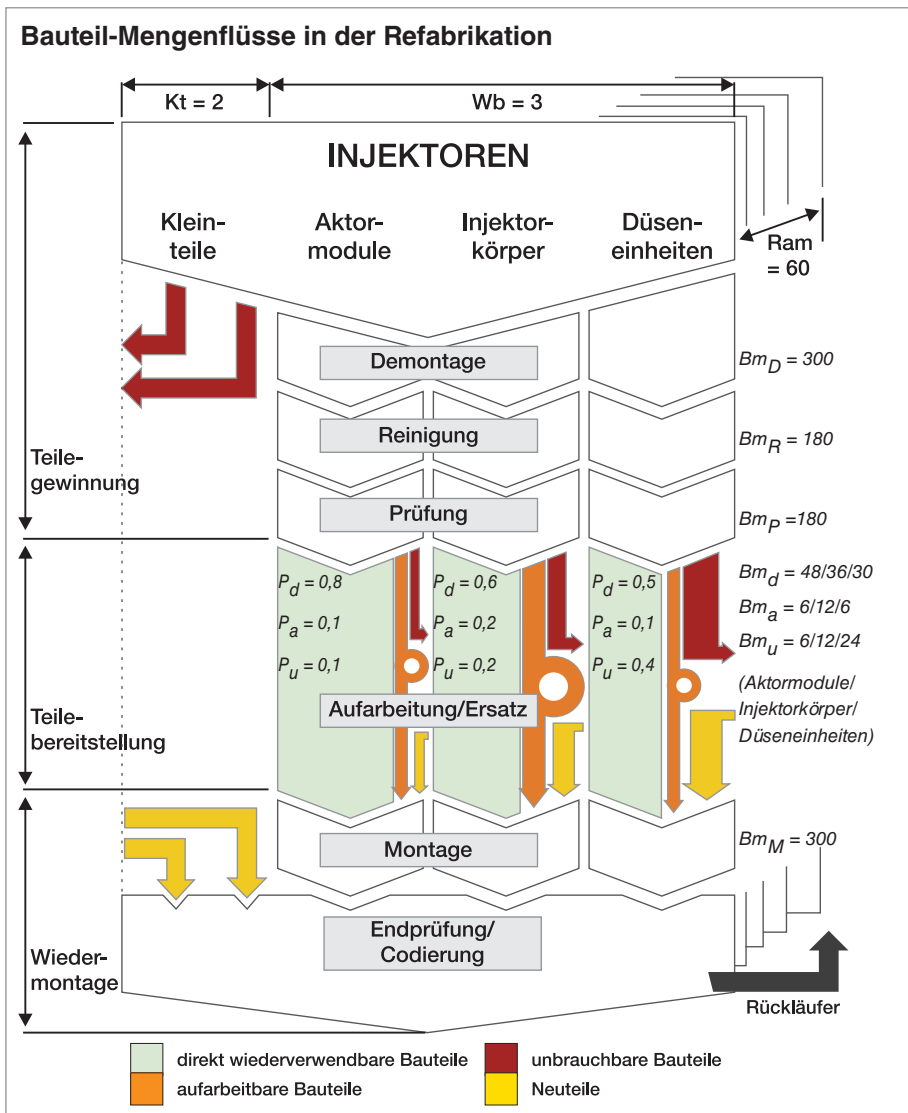


Abbildung 58: Bauteil-Mengenflüsse in der Refabrikation

Weiterhin gilt

$$Bm_{a(n)} = P_{a(n)} * Ram = \text{Menge aufarbeitbarer Bauteile der Ifd. Nr. n}$$

$$Bm_{d(n)} = P_{d(n)} * Ram = \text{Menge direkt wiederverwendbarer Bauteile der Ifd. Nr. n}$$

Die Bauteilmenge der Teilebereitstellung ist

$$Bm_T = \sum_{n=1}^n \left( Bm_{e(n)} + Bm_{a(n)} + Bm_{d(n)} \right)$$

Auch die Teilebereitstellung ist in der Abbildung 58 zugehörig wieder für die drei Injektorenkomponenten illustriert.

Zum Abschluss der Refabrikation, der Erzeugnismontage, ist die Bauteilmenge dann wieder eindeutig zu berechnen. Sie ergibt sich aus der von der Teilebereitstellung hervorgebrachten Menge plus der Kleinteilmenge, die bei der Demontage grundsätzlich ausgesondert wurde und jetzt wieder hinzuzufügen ist.

Somit wird

$$Bm_M = Bm_T + Ram * Kt$$

Dies enthält Abb. 58 im unteren Teil, wobei bezogen auf Injektoren die Endprüfung/Codierung als weiterer Prozessschritt angefügt wurde, der an montierten Injektoren vorgenommen wird, jedoch bei zurückgewiesenen Exemplaren die vorausgehenden Refabrikations-Leistungsbereiche Teilengewinnung und Teilebereitstellung wieder mit entsprechenden Bauteilmengen beliefern wird.

#### 7.5.4 Gezielte Beeinflussung von Bauteilmengen und Kosten durch bewusste Variationen der Relation von Einlieferungsmenge zu Auslieferungsmenge refabrizierter Injektoren.

Als eine wichtige Möglichkeit, die erheblichen, in der Regel maßgeblichen Kosten für notwendige Neuteile sowie für ggf. aufwändige Aufarbeitungsprozesse im Zuge der Refabrikation zu senken, soll hier eine vermehrte Bauteilgewinnung aus einer zusätzlich erworbenen Charge eingelieferter Injektoren diskutiert werden – es erfolgt dabei also eine gezielte Variation der Relation von Einlieferungsmenge zur Auslieferungsmenge ( $R_{E/A}$ ):

Es wird zusätzlich zur Refabrikationsauftragsmenge  $Ram$  eine Ergänzungscharge  $EC$  gebrauchter Injektoren verarbeitet, so dass sich

$$R_{E/A} = \frac{Ram + EC}{Ram} \text{ als Relation errechnet}$$

Mit einem solchen Verhältnis  $R_{E/A} > 1$  können signifikante Senkungen an Neuteile- und ggf. Bauteilaufarbeitungskosten erzielt werden.

Abbildung 59a zeigt eine auf Injektoren angewandte Darstellung der zugehörigen Effekte am Beispiel der Komponente Injektorkörper (mittlerer Strang in Abbildung 59a mit dort angesetzten Prozentsätzen  $P_w = 0,6$ ,  $P_a = 0,2$  und  $P_u = 0,2$ ) und einer Refabrikationsauftragsmenge  $Ram = 100$  Stück.

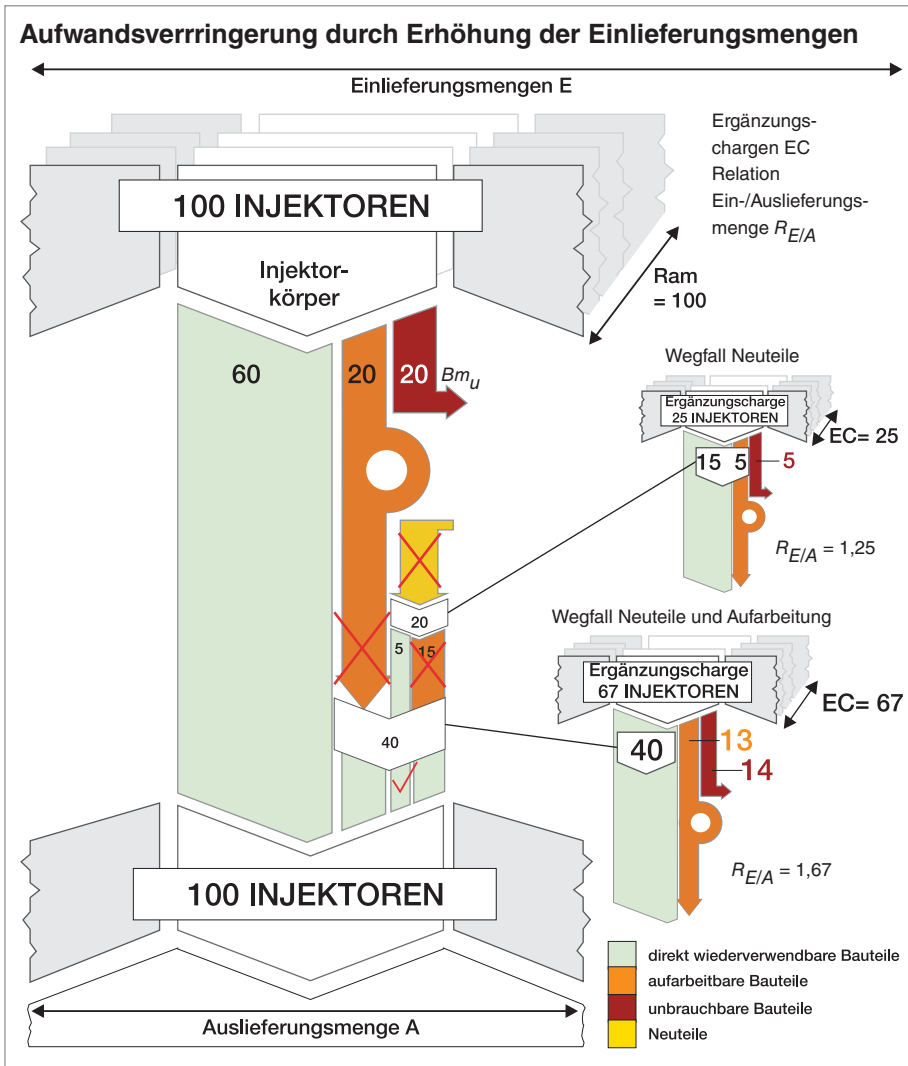


Abbildung 59a: Aufwandsverringierung durch Erhöhung der Einlieferungsmengen

Im oberen Teil der als Hauptstrag dargestellten Bauteilflüsse, also bei  $R_{E/A} = 1,0$ , muss für die Bauteilmenge unbrauchbarer Injektorkörper  $Bm_u$  (Inj.-Körper) : 20 % von 100 Stück, ergibt 20 Stück, die gleiche Bauteilmenge ersetzter Injektorkörper  $Bm_e$  (Inj.-Körper), also 20 Stück hinzugefügt werden.

Arbeitet man mit einem  $R_{E/A}$  von 1,25, bringt man in die Refabrikation also eine Er-



gänzungscharge  $EC$  von 25 zusätzlichen gebrauchten Injektoren ein, benötigt man keine neuen Injektorkörper mehr, um die Refabrikationsauftragsmenge von 100 Stück herzustellen. Die Ergänzungscharge von 25 Injektoren enthält

(wieder mit  $P_w = 0,6$ ) / 15 wiederverwendbare Injektorkörper, nämlich  $0,6 \cdot 25$  sowie (wieder mit  $P_a = 0,2$ ) / 5 aufarbeitbare Injektorkörper, nämlich  $0,2 \cdot 25$ , die zusammen an die Stelle der bisher notwendigen 20 neuen Injektorkörper für die geforderte Auftragsmenge von 100 Injektoren treten können.

Erhöht man  $R_{E/A}$  weiter, so kann man bei dem vorliegenden, in den Abbildungen 58 und 59a verwendeten Injektor- bzw. Zahlenbeispiel ab einem  $R_{E/A} = 1,67$  auch auf die Aufarbeitung von Injektorkörpern verzichten, da die Auftragsmenge von 100 refabrizierten Injektoren nunmehr ausschließlich mit direkt wiederverwendbaren Injektorkörpern erzeugt werden kann, die aus den 100 im Tausch zurückgenommenen Injektoren sowie 67 ergänzt verarbeiteten gebrauchten Injektoren gewonnen werden können.

Die aus dieser Variation von  $R_{E/A}$  resultierende Beeinflussung wichtiger Kostenbestandteile der Refabrikation zeigt Abbildung 59b:

Im Intervall  $1 < R_{E/A} < 1,25$  sinken mittels der aus der Ergänzungscharge gewonnenen direkt wiederverwendbaren sowie aufarbeitbaren Injektorkörper die (variablen) Kosten für bisher notwendige Neuteile zunächst sukzessive bzw. kontinuierlich, bis beim mög-

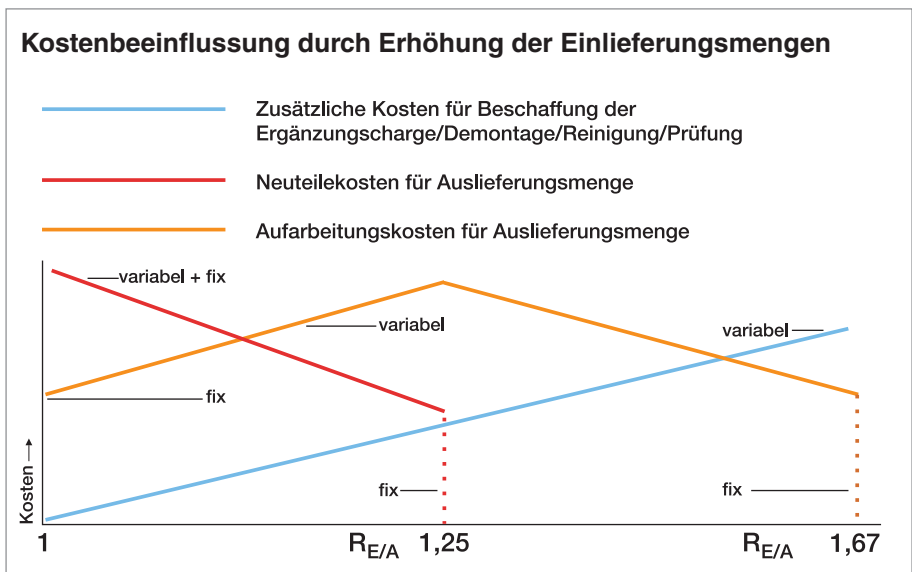


Abbildung 59b: Kostenbeeinflussung durch Erhöhung der Einlieferungsmengen

lich werdenden völligen Verzicht auf Neuteile dann auch (zumindest kalkulatorisch) die bisherigen Fixkosten für Neuteileeinkauf und Lagerhaltung wegfallen.

Parallel entstehen natürlich kontinuierlich ansteigende Kosten für jeden als Ergänzungscharge beschafften zusätzlichen gebrauchten Injektor, dessen Demontage, Reinigung, Prüfung, sowie ansteigende Kosten für eine vermehrte Aufarbeitung der zugehörigen, jetzt auch aus der Ergänzungscharge gewonnen aufarbeitbaren Injektorkörper.

Per Saldo sinken die Teilebereitstellungskosten jedoch spürbar, da der größte Kostenblock der Refabrikation die notwendigen Neuteile sind, auf die dann (bei  $R_{E/A} = 1,25$  im gezeigten Beispiel) vollständig verzichtet werden kann.

Im Intervall  $1,25 < R_{E/A} < 1,67$  sinken nunmehr auch die variablen Kosten der Bauteileaufarbeitung kontinuierlich, bis beim möglichen völligen Verzicht auf eine Bauteileaufarbeitung dann auch (zumindest kalkulatorisch) die bisherigen Fixkosten des Aufarbeitungs-Maschinenparks wegfallen.

Parallel entstehen weiter steigende Kosten für jeden als Ergänzungscharge beschafften zusätzlichen gebrauchten Injektor, dessen Demontage, Reinigung, Prüfung sowie Aufarbeitung (solange noch erforderlich) wie oben beschrieben. Per Saldo ist bei sehr weit erhöhtem  $R_{E/A}$  allerdings durchaus noch eine weitere Senkung der Teilebereitstellungskosten denkbar, wenn nicht nur auf Neuteile, sondern auch auf eine Bauteileaufarbeitung komplett verzichtet werden kann, Abbildung 60.

In der Praxis sind der Verwirklichung dieser letztgenannten Option jedoch meist Grenzen gesetzt:

Einerseits liegt dies darin begründet, dass zusätzliche gebrauchte Injektoren nicht in beliebigen Stückzahlen am Core-Markt verfügbar sind.

Andererseits ist auch zu berücksichtigen, dass man eine am Ziel der Eliminierung von Neuteile- und Aufarbeitungskosten ausgerichtete Relation  $R_{E/A}$  dann am Bauteil bzw. der Komponente mit dem geringsten Prozentsatz direkt wieder verwendbarer Einheiten (oder gleichbedeutend mit der höchsten Summe aus den Prozentsätzen aufarbeitbarer und unbrauchbarer Einheiten) orientieren müsste – im vorliegenden Fall bzw. bei dem in Abbildung 59a gewählten Beispiel und den dortigen Zahlenwerten an der Düseneinheit: Bei deren  $P_u = 50\%$  wäre eine  $R_{E/A}$  von 2,0 erforderlich.

Dies hätte zur Folge, dass aus Komponenten mit höheren Prozentsätzen direkt wieder verwendbarer Einheiten (oder gleichbedeutend höheren Prozentsätzen aufarbeitbarer Einheiten), im vorliegenden Fall also den Injektorkörpern und den Aktormodulen, eine unter Umständen unvertretbar hohe Zahl von an sich wiederverwendbaren Einheiten übrig bleiben, da sie in der Refabrikationsauftragsmenge, d. h. der Anzahl zu liefernder refabrizierter Injektoren, nicht unterzubringen sind.

### Charakteristischer Kostenverlauf der Injektoren-Refabrikation bei Variation der Relation Einlieferungsmenge/Auslieferungsmenge

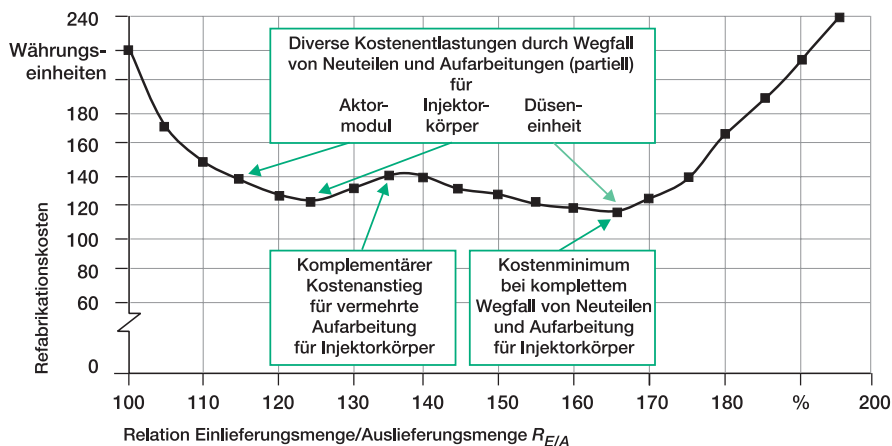


Abbildung 60: Charakteristischer Kostenverlauf der Injektoren-Refabrikation bei Variation der Relation Einlieferungsmenge/Auslieferungsmenge

Statt also wieder in Refabrikationsprodukten verbaut zu werden, wurden diese zusätzlichen Komponenten mit der Ergänzungscharge quasi unnötig beschafft. Zusätzlich besteht das Risiko, dass Aufarbeitungsaufwand getrieben wird, der sich dann als vertan erweist, wenn aufgearbeitete Einheiten in der Refabrikationsauftragsmenge ebenso nicht vollständig unterzubringen sind. Entsprechende Zahlenwerte, wieder orientiert an Injektoren sowie an den in den Abbildungen 58 und 59a angesetzten Prozentsätzen  $P_{d(n)}$ ,  $P_{a(n)}$  und  $P_{u(n)}$  bei variabler  $R_{E/A}$ , zeigt Abbildung 61.

#### 7.5.5 Bestimmung einer für die Injektoren-Refabrikation bestgeeigneten Relation von Einlieferungs- zu Auslieferungsmenge

Im Zuge einer bewussten Erhöhung von  $R_{E/A}$ , also der Relation von Einlieferungsmenge zu Auslieferungsmenge, mit Fokus einer wirksamen Kostensenkung, sollte den folgenden drei Anforderungen entsprochen werden: Zum ersten ist die aus einer Ergänzungscharge gewinnbare Menge an wiederverwendbaren und aufarbeitbaren Einheiten der jeweils betrachteten Art von Komponenten zu ermitteln.

Zum zweiten ist auch eine Auge dafür zu wahren, bzw. zu berechnen, in welchem Umfang mit einer Ergänzungscharge in später obsolete Komponenten investiert wird oder

(positiv ausgedrückt): genau zu berechnen, in welcher Zusammensetzung aus Einzelstückzahlen direkt wiederverwendbarer, aufgearbeiteter und neuer Komponenten aller vorkommenden Arten von Komponenten die Teilebereitstellung an die schlussendliche Injektoren-Montage liefern muss.

Zum dritten ist der Rechenaufwand für die raue Werkstattpraxis bzw. die Gegebenheiten in einem mittelständischen Refabrikationsunternehmen in sinnvollen Grenzen zu halten: es ist also ein Ansatz zu finden, der keine fortlaufende Optimierung, keine ständigen Zahleneingaben zu aktuell verarbeiteten Refabrikationsaufträgen und/oder den Einsatz einer eigens zu entwickelnden Software erfordert, nachdem das bisher einzige bekannt gewordene einschlägige Rechenprogramm „RECOVERY“, entwickelt 1987 und beschrieben in [STE88], bereits seit längerem am Markt nicht mehr erhältlich ist.

Unter Berücksichtigung der genannten drei Anforderungen sind zunächst für die drei Komponenten Aktormodul, Injektorkörper sowie Düseneinheit die zugehörigen Bauteilmengen wie folgt zu berechnen:

Mit  $Bm_{d(n)} = P_{d(n)} * (Ram + EC)$  erhält man die Menge wiederverwendbarer Komponenten der lfd. Nr. n.

Mit  $Bm_{a(n)} = P_{a(n)} * (Ram + EC)$  erhält man die Menge aufarbeitbarer Komponenten der lfd. Nr. n.

Mit  $Bm_{u(n)} = P_{u(n)} * (Ram + EC)$  erhält man die Menge unbrauchbarer Komponente der lfd. Nr. n.

Die so ermittelten Mengen  $Bm_{a(n)}$  und  $Bm_{u(n)}$  sind nun nicht mehr gleich den schlussendlich von der Teilebereitstellung an die Injektoren Montage zu liefernden Mengen aufgearbeiteter und neuer Komponenten der jeweiligen lfd. Nr. n – dies ist ja Zweck und Ziel des Einsatzes einer Ergänzungscharge  $EC$ .

Der vom Verfasser gefundene und gewählte Ansatz mit einem, bezogen auf die angestrebte Kostensenkung, wirksamsten Aufwand-/Nutzenverhältnis nutzt zunächst die Voraussetzung bzw. Erwartung, dass Injektoren am sich dazu entwickelnden Core Markt günstig erhältlich sein werden, da sie als Gebrauchtteile von niemandem direkt eingesetzt werden können (vgl. Unterabschnitt 5.7.2), so dass hier keine konkurrierende Nachfrage entsteht. Sie werden insbesondere günstiger erhältlich sein als neue Ersatz-Komponenten, da letztere ausschließlich vom Originalhersteller bezogen werden können, der hierfür ein Monopol hat, da deren Produktionstechnologie für freie Anbieter (die es bei anderen Refabrikationsprodukten zahlreich gibt) nicht entwickelbar bzw. verfügbar sein wird.

Im weiteren entscheidet sich der vom Verfasser gefundene und gewählte Ansatz für eine eindeutige Ausrichtung der zusätzlich zu erwerbenden optimale Ergänzungsscharge  $EC_{opt}$  nach der teuersten Komponente des Injektors – und zwar so, dass die erforderliche Bauteilmenge für diese Komponente genau zu Null wird, während sich die Bauteilmengen der beiden anderen Injektorenkomponenten dann nach diesem  $EC_{opt}$  zu richten haben.

Die sich aus diesem gewählten Ansatz ergebende Situation zeigt Abbildung 61, wieder unter Nutzung der Zahlenwerte aus den Abbildungen 58 und 59a sowie der ergänzenden Bedingung, dass es sich beim Injektorkörper (aufgrund seines filigranen Innenlebens) um die teuerste Komponente handelt.

### Überzähligkeit von aufarbeitbaren/verwendbaren Bauteilen bei sukzessiver Erhöhung der Relation Einlieferungs-/Auslieferungsmenge

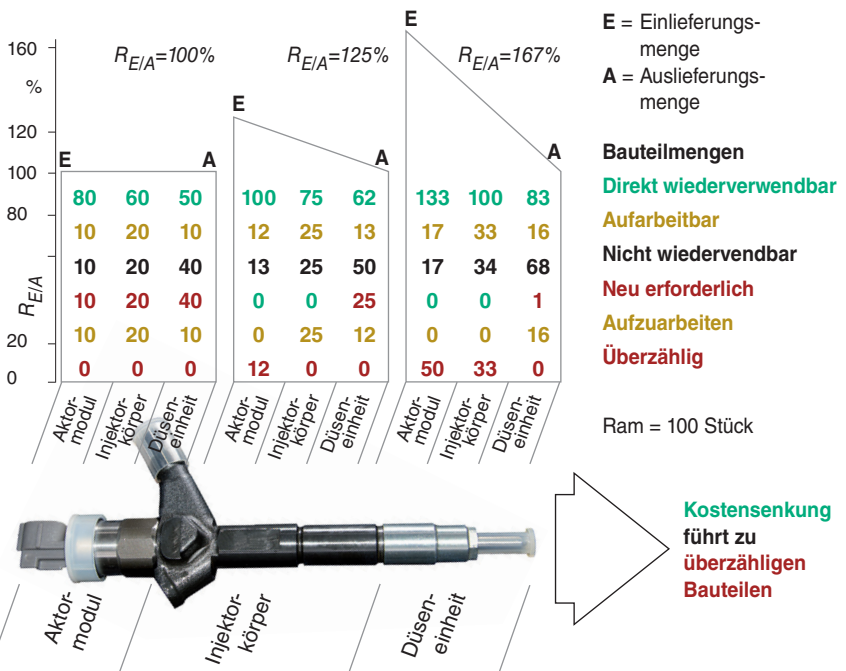


Abbildung 61: Überzähligkeit von aufarbeitbaren/verwendbaren Bauteilen bei sukzessiver Erhöhung der Relation Einlieferungs-/Auslieferungsmenge, Illustrationsquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln (Injektor)

Gibt man der Komponente Injektorkörper die laufende Nr. 2 und setzt die erforderliche Bauteilmenge zu ersetzender Injektorkörper, die sich mit

$$Bm_{e(2)} = P_{u(2)} * Ram - (P_{d(2)} + P_{a(2)}) * EC$$

errechnen lässt, zu Null, so lässt sich die optimale Ergänzungsladung  $EC_{opt}$  bei

$$Bm_{e(2)} = 0,$$

oder entsprechend

$$P_{u(2)} * Ram - (P_{d(2)} + P_{a(2)}) * EC = 0$$

$$\text{mit } EC_{opt} = \frac{P_{u(2)} * Ram}{P_{d(2)} + P_{a(2)}} \quad \text{berechnen.}$$

Mit den Werten aus dem Zahlenbeispiel der Abbildungen 58 und 59a.

$$Ram = 100$$

$$P_{d(2)} = 0,6$$

$$P_{a(2)} = 0,2$$

$$P_{u(2)} = 0,2$$

$$\text{ergibt sich } EC_{opt} \text{ mit } \frac{0,2 * 100}{0,6 + 0,2} = \frac{20}{0,8} = 25$$

zusätzlich als Ergänzungsladung zu beschaffende Injektoren, bzw. ein  $R_{E/A}$  von 1,25, wie es in Abbildung 61 für einen Neuteilebedarf von Null Injektorkörpern bereits veranschaulicht wurde. Es bleiben auch keine aufarbeitbaren Injektorkörper bei der Ergänzungsladung  $EC_{opt}$  von 25 Stück übrig.

Bei den anderen beiden Injektorenkomponenten sind dann die zugehörigen Bauteilmengen weiterhin notwendiger (aber weniger) neuer sowie ggf. übrig bleibender neuer und/oder aufgearbeiteter Komponenten wie folgt zu berechnen:

Aktormodul (Ifd. Nr. 1):

$$Bm_{e(1)} = P_{u(1)} * Ram - (P_{d(1)} + P_{a(1)}) * EC$$

Hier ergibt sich mit  $EC_{opt} = 25$  und den Zahlenwerten des letzten schon durchgerechneten Refabrikationsfalls

$$Bm_{e(1)} = 0,1 * 100 - (0,8 + 0,1) * 25$$

mit  $Bm_{e(1)} = -12,5$  ein negativer Zahlenwert: es sind also keine Neuteile notwendig;

allerdings bleiben einige an sich wiederverwendbare bzw. alle aufarbeitbaren Aktormodule übrig.

Düseneinheit (Ifd. Nr. 3):

$$Bm_{e(3)} = P_{u(3)} * Ram - (P_{d(3)} + P_{a(3)}) * EC$$

Hier ergibt sich entsprechend

$$Bm_{e(3)} = 0,4 * 100 - (0,5 + 0,1) * 25$$

mit  $Bm_{e(3)} = 25$  noch ein Neuteilebedarf, auch wenn alle direkt wiederverwendbaren und aufarbeitbaren Düseneinheiten herangezogen werden.

Der vom Verfasser mittels umfangreich variierten Modellrechnungen, insbesondere mit der Geheimhaltung unterliegenden tatsächlichen Ausschussprozentsätzen und Teilkosten, hier gefundene und empfohlene dispositive Ansatz zur Kostensenkung in der Injektorenrefabrikation durch die beschriebene Ermittlung einer optimalen Ergänzungscharge  $EC_{opt}$  macht insbesondere dann Sinn, wenn man es einerseits mit „nur“ drei Hauptkomponenten zu tun hat, von denen eine zudem als besonders kostenintensiv hervorsteht, und wenn andererseits in einem noch jungen Refabrikationszweig noch keine umfangreichen Statistiken zu Prozentsätzen wiederverwendbarer, aufarbeitbarer und unbrauchbarer Komponenten von Ergänzungschargen aus internationalen Quellen und von unterschiedlichen Lieferanten vorliegen, da sich der zugehörige Coremarkt erst entwickelt.

Man kann mit diesem Ansatz sogar gänzlich auf umständliche Berechnungen verzichten, indem man konsequent das eingangs dieses Kapitels beschriebene Prinzip des „Assemble to Order“ (ATO) verwirklicht und refabrizierte Injektoren aus einem Vorratslager demontierter, gereinigter, geprüfter und ggf. aufgearbeiteter Komponenten herstellt, das man immer wieder aus Ergänzungschargen gebrauchter Injektoren so nachfüllt, dass für die teuerste Komponente nie Neuteile für die Refabrikation erforderlich sind, aber von dieser teuersten Art auch keine wiederverwendbaren Teile übrig bleiben.

Aufwändige Berechnungs- und Optimierungsverfahren, wie die Ermittlung einer günstigen Relation  $R_{E/A}$  für Refabrikationsprodukte mit Hunderten von Bauteilen über eine Erfassung und Verarbeitung der Einzel- und Gemeinkosten sämtlicher Altprodukte, Bauteile und Prozesse, wie diese in [STE88] beschrieben werden, können mit diesem hier entwickelten Ansatz also vollständig vermieden werden, ohne sich signifikante Kostensenkungspotentiale entgehen zu lassen.

Die Refabrikation von Injektoren hält weitere wichtige Herausforderungen noch viel stärker auf technischem Gebiet bereit als in der organisatorischen Feinoptimierung. Sehr entscheidend für ein Vorankommen auch bei dem hier beschriebenen dispositiven Optimierungsansatz ist es nämlich, technologische Fortschritte bei der Demon-

tage und Wiedermontage/Justierung der beiden Injektorenkomponenten Aktormodul und Injektorkörper (vgl. Unterabschnitt 6.4.3) auch für herstellerunabhängige Refabrikationsunternehmen zu entwickeln, so dass in der Refabrikationspraxis unbrauchbare Aktormodule und Injektorkörper unabhängig voneinander ersetzt und im Prozessschritt Wiedermontage neu gepaart und justiert werden können.

Eine zugehörige technologische Lösung, die vom Prinzip her auf der akustischen Erfassung der Zeitspanne von der Bestromung des Aktormoduls bis zum mechanischen Kontakt am Ventil beruht, wahrt der Verfasser zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch als sein geistiges Eigentum. Es kann jedoch bereits zum jetzigen Entwicklungsstand gesagt werden, dass der erforderliche Entwicklungsaufwand unter Zugrundelegung realistischer Kostengefüge bei Injektorenkomponenten, notwendigen Vorrichtungen etc. bereits im Anlauf eines Refabrikationsengagements, insbesondere aber angesichts der weiter ansteigenden Refabrikationsstückzahlen unternehmerisch interessante Amortisationszeiten erwarten lässt, Abbildung 62.

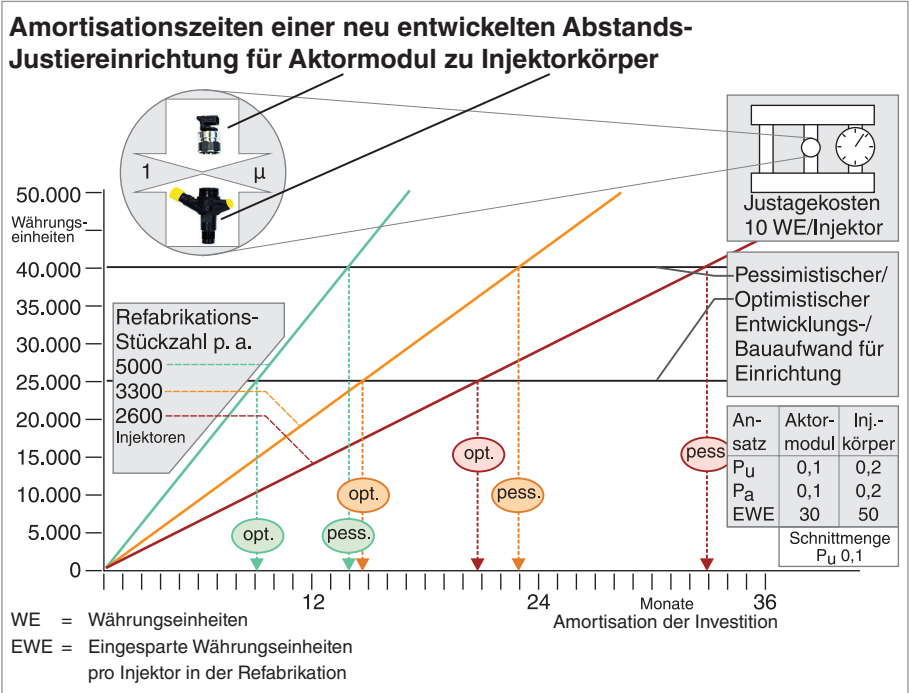


Abbildung 62: Amortisationszeiten einer neu entwickelten Abstands-Justiereinrichtung für Aktormodul zu Injektorkörper auf 1  $\mu$



## **8. Entwicklung der Refabrikationsprozessschritte zur Erzeugnismontage mit Endprüfung und Codierung**

### **8.1 Abfolge der Prozessschritte**

Die Abfolge der Prozessschritte zur Erzeugnismontage umfasst bei Injektoren die drei Stationen Wiedermontage, Endprüfung und Codierung, Abbildung 63.

Im Vergleich zu anderen Refabrikationsprodukten im Automobilsektor muss insbesondere die Station Endprüfung bemerkenswert aufwändiger ausgelegt werden als anderswo üblich – der hierbei durchzuführende Prüfzyklus muss dreierlei Zwecken dienen:

Erprobungsweises Vorwegnehmen der Belastungen des Injektors im späteren Motorbetrieb durch umfassende Funktionstests.

Bereichsweises Nachholen der Prüfung bestimmter Qualitätsmerkmale aufgrund der in den vorangegangenen Prozessschritten an geometrische Grenzen des Standes der Technik gestoßenen Prüfmöglichkeiten.

Parameterweises Codieren spezifischer individueller Injektoreigenschaften für das spätere Programmieren des Motorsteuergeräts bzw. der EDC (Electronic Diesel Control) im Zuge des Einbaus des refabrizierten Injektors ins Fahrzeug.

Insbesondere beim letztgenannten Zweck sieht man sich als mittelständisches Refabrikationsunternehmen einer besonderen, im Verbund zwischen Injektorhersteller und Prüfstandshersteller gewährten äußerst strikten Geheimhaltungspolitik ausgesetzt, welche spezifischen Injektoreigenschaften sich in welchen Codierungswerten niederschlagen. Ebenso lassen sich im Falle von nach dem Prüfstandslauf zurückgewiesenen Injektoren nur sehr bedingt Rückschlüsse ziehen, welches Ausmaß beanstandete Funktionsmängel haben und wo ggf. die Ursachen bei innerer Kontamination und/oder Geometrie aufzuspüren sind.

In mehrjähriger Refabrikationspraxis lassen sich zwar einzelne Zusammenhänge erkennen, wenn man beanstandete Injektoren nacharbeitet bzw. dem Refabrikationsprozess erneut zuführt, doch verdient der hier im Zuge der Arbeit des Verfassers aufgebaute Erfahrungsschatz an Knowhow durchaus noch einen weiteren Ausbau in der Zukunft.

## **8.2 Refabrikationsumgebung**

In der Erzeugnismontage ist die technische Sauberkeit von Arbeitsplätzen, Betriebsmitteln und Hilfsmitteln im gleich hohen Maße angezeigt wie in der in den Abschnitten 6.2 und 7.2 für die Teilengewinnung und Teilebereitstellung definierten Spezifikation.

Bei der Montage der montierten Injektoren auf dem Prüfstand ist insbesondere auf technische Sauberkeit von hydraulischen Anschlüssen zu achten, um einerseits nicht das Injektoreninnere zu guter Letzt doch noch mit Verunreinigungen zu kontaminieren, andererseits auch geringste Leckagen zu vermeiden, um resultierenden Messwertverfälschungen vorzubeugen.

## **8.3 Beitrag zum Refabrikationserfolg**

Der Beitrag des Leistungsbereichs Erzeugnismontage zum Refabrikationserfolg ist primär die Ja-Nein Entscheidung: beim Prüfstandstest wird die erfolgsentscheidende Aussage getroffen, ob die Refabrikation erfolgreich war oder nicht.

Sorgfalt bei der technischen Sauberkeit und der peniblen Einhaltung aller Prozessparameter der im nachfolgenden Abschnitt darzustellenden entwickelten Prozessschritte zur Injektorenmontage haben – keineswegs sekundär – jedoch ebenso erfolgswichtige Bedeutung. Im Anschluss an die absolvierte Injektorenmontage ist sodann das Augenmerk darauf zu richten, die Vorgaben des Prüfstandherstellers, der diese im engen Verbund mit dem Injektorenhersteller ausgibt und pflegt, vgl. die Ausführungen im Abschnitt 8.1, so stringent wie möglich einzuhalten

## **8.4 Entwicklung der Prozessschritte**

Im Zuge zweijähriger Entwicklungsarbeit und zugehöriger Versuchsreihen, die im vorliegenden Zusammenhang maßgeblich von Injektoren- sowie Prüfstandsherstellern mitgetragen wurden, ergaben sich die im Folgenden beschriebenen Prozessschritte für eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche Erzeugnismontage in der Injektoren-Refabrikation.

Die anschließenden Unterabschnitte erläutern und illustrieren diese insoweit, dass keine Betriebsgeheimnisse der Hersteller verletzt werden.

## 8.4.1 Wiedermontage

Der Umfang der Injektoren-Wiedermontage richtet sich selbsterklärend nach der gewählten Demontagetiefe im primären Refabrikations-Leistungsbereich Teillegewinnung. Die dort grundsätzlich demontierte und jetzt vom Refabrikations-Leistungsbereich Teilbereitstellung angelieferte Düseneinheit ist in jedem Fall wieder am Injektor-Körper zu montieren. Dies hat mit dem Drehmoment- und Drehwinkel-gesteuerten Anziehen der Düsenspannmutter nach zugehörigen engen Vorgaben zu geschehen. Hierbei empfiehlt es sich als Besonderheit, die Spannmutter zunächst mit einem höheren Drehmoment als dem schlussendlich vorzugebenden anzuziehen und wieder zu lösen – dadurch ist ein besonders präzises Einhalten der endgültigen Vorgabewerte zu erzielen. Wichtig ist weiterhin, dass der Drehwinkel-gesteuerte Anzug in einer ununterbrochenen Drehbewegung erfolgt. Einen der zugehörig entwickelten und im Einsatz befindlichen Wiedermontage-Arbeitsplätze sowie die Vorgabewerte für einen Beispiel-Injektor zeigt Abbildung 64.



Abbildung 64: Drehmoment - und Drehwinkeldefinierte Montage der Düseneinheiten an die Injektoren, Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

Je nach Demontagetiefe des Injektors in den vorausgegangenen Refabrikations-Leistungsbereichen ist auch die Betätigungsstange wieder im Injektorkörper zu montieren, wobei als wichtigster Anhaltspunkt für eine funktionell gute Paarung zwischen Führung und Betätigungsstange deren Gleiteigenschaften beziehungsweise Gleitgeschwindigkeit heranzuziehen ist: die Paarung ist genau dann als angemessen zu bewerten, wenn die Betätigungsstange, benetzt mit Dieselöl, durch ihr Eigengewicht innerhalb von  $2 \text{ sec} \pm 0,5 \text{ sec}$  (Werte für einen Beispiel-Injektor) in den Injektorkörper hineingleitet.

Bei noch weiter getriebener Demontagetiefe in den vorausgegangenen Refabrikations-Leistungsbereichen sind in der Wiedermontage auch Aktormodul und Injektorkörper neu zu montieren und zu justieren. Maßgeblich sind hier nicht Anzugsdrehmoment und -drehwinkel der Schraubverbindung, sondern (vgl. Unterabschnitt 6.4.3) der zu justierende Abstand zwischen den jeweiligen bewegten Teilen. Steht die erforderliche Abstands-Prüf-/Justiereinrichtung für diese Aufgabe (vgl. Unterabschnitt 7.5.5) zur Verfügung, so sind Aktormodul und Injektorkörper so eng miteinander zu verschrauben, bis der Abstand auf das einzelne  $\mu$  genau stimmt. Hierzu sind entsprechend in Axialrichtung verformbare Dichtungskörper an den verschraubten Verbindungsflächen das Mittel der Wahl.

Nach Abschluss der Injektorenmontage und noch vor der eigentlichen Funktionsprüfung ist ein Dichtheitstest des refabrizierten Injektors angezeigt. Hierbei ist ein Prüfdruck anzulegen und die Zeitspanne bis zu einem definierten Druckabfall, die innerhalb definierter Grenzen liegen muss, zu messen. Eine der zugehörig entwickelten Prüfstationen und die zu prüfenden Parameter, wiederum für einen Beispiel-Injektor, zeigt Abbildung 65.



Abbildung 65: Prüfstation zur Injektoren-Dichtheitsprüfung nach der Wiedermontage vor dem Prüfstandslauf, Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

### 8.4.2 Endprüfung

Der Entwicklungsaufwand für Einrichtungen zur Endprüfung refabrizierter Injektoren auf Funktion und Einhaltung relevanter Betriebsparameter ist so beträchtlich, dass er sich nur für die Refabrikationspraxis eines mittelständischen Unternehmens, wie es der Verfasser hier vertritt, nicht rechtfertigen ließe. Dass dieser Aufwand auch absolut gesehen beträchtlich ist, lässt sich an der Tatsache erkennen, dass es weltweit lediglich zwei Anbieter von Injektoren-Prüfständen gibt, die sich dieser Aufgabe angenommen haben und zugehörige Lösungen anbieten – sei es für die Injektoren-Neuproduktion oder deren Refabrikation.

Angesichts dieser Gegebenheiten ist es aus mittelständischer Unternehmenssicht schon als glücklicher Umstand zu werten, dass derartige Prüfstände nicht nur erwerbbar, sondern im Hinblick auf den erzielbaren Return on Investment auch bezahlbar sind.

Aus Sicht der hier vorgelegten Arbeit kann es weiterhin als deren Umfang entlastend gewertet werden, dass solche erwerbbare Prüfstände inkl. aller Prüfprogramme, Betriebsvorschriften samt Gut-/Schlecht-Ergebnisabgabe quasi schlüsselfertig verfügbar sind, so dass sich zugehörige detaillierte Ausführungen im Folgenden erübrigen.

Als Refabrikationsunternehmen erwirbt man somit betriebsbereite Injektoren-Prüfstände und betreibt diese sehr weitgehend als „Black Box“; d. h. man akzeptiert und respektiert die ihnen innewohnenden Betriebsgeheimnisse der Injektoren- und Prüfstandshersteller (vgl. Abschnitt 8.1). Bestandteil der umfassenden Prüfung sind unter anderem auch die in dieser Arbeit bereits diskutierten bzw. dargestellten Prüfläufe zur Messung von Rücklaufmenge, Rücklauftemperatur, Antwortzeit, Antwortabweichung, Abgabemenge und Abgabeabweichung (vgl. Unterabschnitt 4.2.2 und dort Abbildungen 33 a bis c), jeweils in verschiedenen Lastzuständen, die der Prüfstand vollständig autonom erledigt.

Dennoch liegt das Zustandekommen einer verlässlichen Endprüfung noch in einem nennenswert bedeutenden Maße in der Verantwortung und in der Hand des Refabrikationsunternehmens: Hier ist für ein gezieltes Zusammenwirken von zweimal täglichen Prüfstandskalibrierungen mit Master-Injektoren, hochqualifiziertem Prüfpersonal, strikter Befolgung der jeweiligen Prüfprogramme, penibler Einhaltung aller Betriebsvorschriften sowie Sorgfalt und Sauberkeit bei der Injektorenaufspannung für den Prüfzyklus Sorge zu tragen.

Der in der vorigen Aufzählung letztgenannte Punkt, die gewissenhaft sorgfältige Aufspannung des Injektors auf dem Prüfstand (bzw. je nach Ausbaustufe des Prüfstandes bis zu vier Injektoren gleichzeitig) ist ein für das korrekte Prüfergebnis mit entscheidender Arbeitsgang: vor allem bei den Anschlüssen der Hochdruckleitungen muss auf peinliche Sauberkeit und absolute Dichtheit geachtet werden, weshalb diese auch mit vorgegebenem Drehmoment anzuziehen sind, Abbildung 66.

## Injektoren-Montage auf dem Prüfstand



Abbildung 66: Montage der wiedermontierten Injektoren auf dem Prüfstand,  
Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

Im Übrigen sollte bei der Befolgung der jeweils vorgegebenen Prüfprogramme zwar respektiert werden, dass der Prüfstand – anhand von seitens des Refabrikations-Unternehmens nicht zugänglichen und nicht nachvollziehbaren Prüfalgorithmen – die „Gut-/Schlecht“-Entscheidung über den geprüften Injektor autonom fällt, Abbildung 67.

Doch sollte im Falle einer „Schlecht“-Entscheidung, die dem Refabrikationsunternehmen einen Rückläufer beschert, alles daran gesetzt werden, einen Bezug zwischen dem im Prüfstandslauf als mangelhaft eingestuftem Injektor und bestimmten, zu vorausgegangenen Refabrikations-Prozessschritten rückverfolgbaren Gegebenheiten herauszuarbeiten. Dies im eigenen Interesse des Refabrikationsunternehmens, um im Bemühen um kontinuierliche Verbesserungen die als ursächlich zu vermutenden Prozessschritte sowohl für den betroffenen Injektor-Rückläufer, als auch insgesamt weiter zu optimieren.

In der Refabrikationspraxis des Unternehmens des Verfassers erwies sich etwa das im vorausgegangenen Unterabschnitt behandelte definierte Hineingleiten der Betätigungsstange in den Injektorkörper durch Schwerkraft als Schlüsselprozess für bestimmte bei der Endprüfung erlebte Zurückweisungen von Injektoren.



## Vollautomatischer Injektorenprüfstand

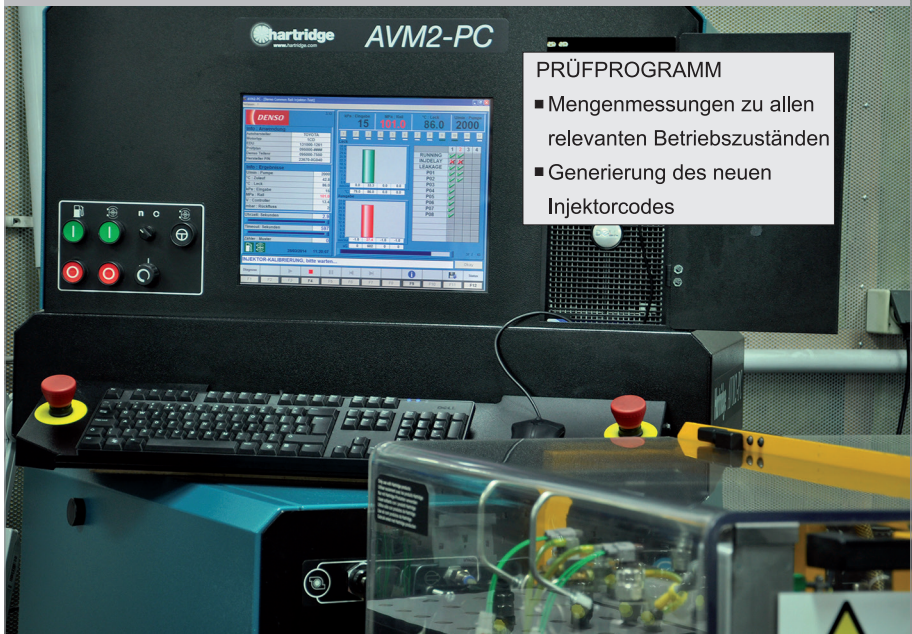
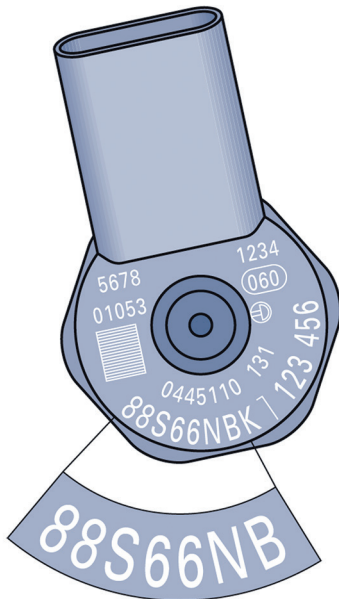


Abbildung 67: Vollautomatische Endprüfung auf zweimal täglich präzise kalibriertem Injektorenprüfstand, Bildquelle: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

Im Falle einer „Gut“-Entscheidung, die bei sorgfältiger Refabrikation den Regelfall darstellt, generiert der Prüfstand unmittelbar den Injektor-Code, dessen Beschaffenheit und Applikation der folgende Unterabschnitt beschreibt.

### Codierungen des Injektor-Mengen-Abgleichs (IMA)



**Fabrikat BOSCH**



**Fabrikat DENSO**

Abbildung 68: Codierungen des Injektor-Mengen-Abgleichs (IMA)

Bildquellen: Fachkunde Fahrzeugtechnik, © Verlag Europa-Lehrmittel und Schmitz + Krieger GmbH, Köln

### 8.4.3 Codierung

Als Resultat der Endprüfung aller relevanten Betriebsparameter eines Injektors auf dem Prüfstand gibt dieser die (Hersteller-individuellen) Codes aus, die auf dem Injektor an einer geeignet vorbereiteten Stelle in – auch für das menschliche Auge – lesbarer Form aufzudrucken sind, Abbildung 68.

Mit diesen Codes, die beim späteren Einbau des refabrizierten Injektors in ein Fahrzeug dem Motorsteuergerät mitzuteilen bzw. einzuprogrammieren sind, werden zahlreiche vom Prüfstand implizit ermittelte geometrische und dynamische Kenngrößen des Injektors im späteren Fahrbetrieb entsprechend berücksichtigt. Zum Beispiel wird ein erweiterter Durchmesser der Düsen-Spritzlöcher dem Motorsteuergerät so mitgeteilt, dass dieses daraus die jetzt für den individuellen Injektor zutreffende Korrelation zwischen Einspritzdauer und Einspritzmenge erkennen und steuern kann; etc.





Abbildung 69: Verpackungsstation für korrosionsgeschützte und transportsichere Injektoren-Auslieferung, Bildquellen: Schmitz + Krieger GmbH, Köln

Nach erfolgter Codierung des Injektors bildet dessen Verpackung in einem korrosionshemmenden Beutel, stoßschützender Luftpolsterfolie und Kartonage, den Abschluss der Refabrikation, Abbildung 69.

Damit sind dann alle Prozessschritte erfolgreich abgeschlossen – die in der vorliegenden Arbeit entwickelten und dargestellten Technologien ermöglichen die Refabrikation auch solch anspruchsvoller Kfz-Komponenten wie Common Rail Injektoren in modernen Einspritzsystemen.

## 9. Synthese der Entwicklungen

Die zur Erreichung der für diese Arbeit gesteckten Ziele unternommenen ingenieurwissenschaftlichen Arbeiten münden in einem Dreiklang entwickelter Lösungen für die

- technische/logistische Gestaltung der Versorgung eines Refabrikationsunternehmens mit lohnenden Injektoren aus dem Kfz-Handwerk und den sich entwickelnden Core-Märkten
- technisch/wirtschaftliche Evaluierung der Eignung von Injektoren zur Refabrikation und zum Aufbau eines zugehörigen Geschäftsfeldes
- technisch/organisatorische Spezifikation sämtlicher Refabrikationsprozesse für Injektoren von der Teilegewinnung über die Teilebereitstellung bis zur Erzeugnismontage

Eine Synthese dieser drei durchgeführten Entwicklungen bildet ein methodisch fundiertes und zugleich praxisgerechtes Handlungsgerüst für die unternehmerische Realisierung des Recycling-Prinzips in Form einer Refabrikation auch solch technologisch anspruchsvoller Produkte wie Injektoren und lässt eine dynamische Aufwärtsentwicklung dieses neuen Geschäftsfeldes erwarten.

Abbildung 70 (oben) symbolisiert dies mittels einer passenden – vom Urheberrechtinhaber hierfür freigegebenen – Grafik, die den Kreislauf der im oben beschriebenen Dreiklang ausgearbeiteten Kapitel vortrefflich schließt.

Die drei Piktogramme der benutzen Grafik illustrieren dabei auch recht treffend, dass für eine erfolgreiche Refabrikation von Common Rail Injektoren

- die Handarbeit (an der Basis) im Kfz-Gewerbe
- die Kopfarbeit (linkes Segment) als unternehmerisches Denken in Marktgefügen und Geschäftsfeldchancen
- die Technikarbeit (rechtes Segment) in den Entwicklungsabteilungen und Werkhallen der Refabrikationsunternehmen

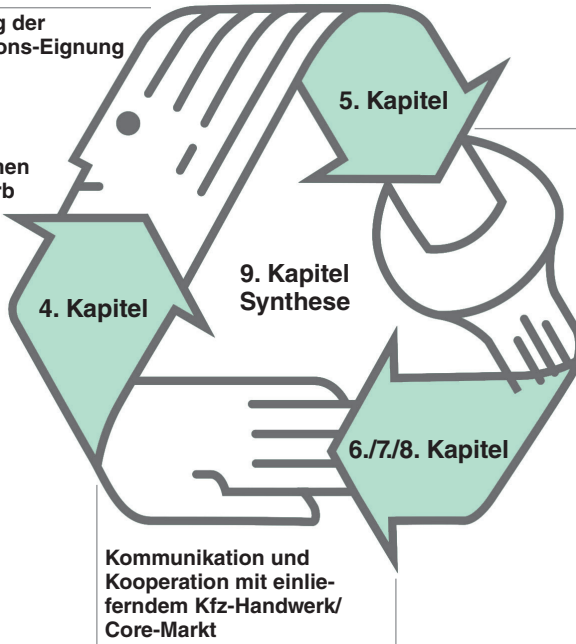
ihren jeweiligen ernst zu nehmenden Platz haben muss.

Die bis zur Anfertigung der vorliegenden Arbeit allenthalben geläufige Instandsetzungspraxis für Injektoren, der noch eher die Merkmale einer (umgangssprachlich:) „Reparatur“ (bzw. englisch: repair) attestiert werden mussten, war bis dato auch an der von den Markeninhabern geübten Praxis der Beschriftung des Ersatzteilkartons ablesbar:

## Synthese der Entwicklungen

### Evaluierung der Refabrikations-Eignung

- Technik
- Mengen
- Werte
- Zeit
- Innovationen
- Wettbewerb



### Technologieentwicklung

- Teilegewinnung
- Teilebereitstellung
- Erzeugnis-montage

Kommunikation und Kooperation mit einlieferndem Kfz-Handwerk/ Core-Markt

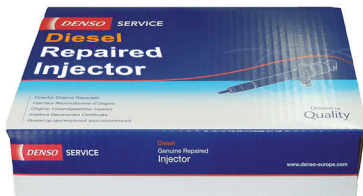


Abbildung70: Synthese der Entwicklungen

Dort steht bis heute „Repaired Injector“ (Abbildung 70 unten links). Mit den erzielbaren Fortschritten und dem Wissensschatz der hier vorgelegten Arbeit dürfte dagegen ein Aufdruck wie „Remanufactured Injector (Abbildung 70 unten rechts) zunehmend gerechtfertigt sein.

## 10. Zusammenfassung und Ausblick

Refabrikation steht angesichts ökonomischer und ökologischer Triebfedern vor weiteren Wachstumsschüben – sowohl qualitativ als auch quantitativ.

Unabdingbare Voraussetzung hierfür ist es gleichwohl, dass der Refabrikation ein Technologie-Portfolio zur Verfügung steht, das mit den produkt- und produktionsseitigen Innovationen bei der Herstellung neuer Produkte – im vorliegenden Zusammenhang von Kraftfahrzeugen – Schritt hält.

Die hier vorgelegte Arbeit leistet hierzu einen ersten – und bislang [MÜN15] den einzigen – wissenschaftlichen Beitrag zur Technologie-Entwicklung für die Refabrikation von (Common Rail) Einspritzsystemen.

Dieser Anspruch bzw. das zugehörige Arbeitsziel wird zunächst hinsichtlich seiner wichtigsten Teilziele detailliert und präzisiert. Anschließend wird eine methodische Vorgehensweise mit aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen ausgearbeitet und mit ingenieurwissenschaftlichem Methodenrepertoire abgearbeitet. Die anzugehenden Arbeiten werden am Stand der Technik und der Erkenntnisse gespiegelt, um das zu erschließende technische/wirtschaftliche Neuland herauszukristallisieren und zu fokussieren.

Hierbei entschied sich der Verfasser für die technologisch anspruchsvollsten Komponenten in modernen Einspritzsystemen, namentlich die Common Rail Injektoren.

Zugehörig wurde das Thema sodann abgearbeitet in einem logischen Aufbau, der einerseits den chronologischen Ablauf der Refabrikation von der Injektoren-Diagnose im Kfz-Handwerk bis zur Auslieferung eines refabrizierten Injektors minutiös abbildet, andererseits auch die am Weg liegenden bzw. auftauchenden Fragen zur Sinnfälligkeit bzw. Rentabilität der Injektoren-Refabrikation nicht außer Acht lässt.

Für die Diagnose und den Ausbau von Common Rail Injektoren im Kfz-Handwerk gelang es, mittels umfangreicher Chargenuntersuchungen und Fallstudien neue Erkenntnisse zur besser abgesicherten Schadensdetektion draußen im Feld, zur besser begründeten und besser gesicherten Belieferung von Refabrikationsunternehmen sowie zur Intensivierung der technisch orientierten Kommunikation zwischen allen am Service-Zyklus Beteiligten zu erarbeiten und als Empfehlung zu formulieren.

Eine für die gesamte Arbeit zentrale Frage, nämlich die Evaluierung der Eignung von Common Rail Injektoren zur Refabrikation aus marktwirtschaftlich unternehmerischer Sicht, wurde in einem eigenen Schwerpunkt detailliert bearbeitet und dergestalt beantwortet, dass Injektoren sowohl angesichts bereits wissenschaftlich etablierter Entscheidungsfiler, insbesondere aber auch hinsichtlich einiger für diese Arbeit neu entwickelter und formulierter Evaluierungskriterien ein ausgesprochen aussichtsreiches

und zukunftsträchtiges Geschäftsfeld für eine Refabrikationsunternehmen repräsentieren – immer vorausgesetzt, die erforderlichen Technologien sind verfügbar bzw. werden entwickelt.

Die Technologieentwicklung ist somit der dritte – und in sich dreiteilige – Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit und gliedert sich in entwickelte Technologien für die Refabrikations-Leistungsbereiche zur Teilegewinnung (mit den Prozessschritten Eingangsprüfung, Demontage, Reinigung/Spülung sowie Prüfung und Sortierung); Teilebereitstellung (mit den Prozessschritten Befundung, Aufarbeitung und Kommissionierung) und abschließend Erzeugnismontage ( mit den Prozessschritten Wiedermontage, Endprüfung und Codierung).

Im Einzelnen zeigte sich in allen drei genannten Refabrikationsbereichen, dass Common Rail Injektoren derart höhere und auch andersartige Anforderungen an des Refabrikationsgeschehen stellen, als diese aus der industriellen Praxis mit anderen Refabrikationsprodukten im Kfz-Sektor geläufig, beherrscht oder etabliert sind, dass hierfür neue Wege zu beschreiten sind.

Diese Herausforderungen ließen sich nur meistern, indem bei Kfz-Refabrikationsprodukten bisher nirgendwo praktizierte neue Prozessfolgen entwickelt und erprobt wurden, die zugehörigen Refabrikations-Arbeitsplätze errichtet und entsprechende Betriebsmittel installiert und betrieben wurden, um die Realisierbarkeit der präsentierten Technologieentwicklungen zu verifizieren. Dies konnte der Verfasser in dem von ihm geleiteten Refabrikationsunternehmen dann auch leisten.

Parallel zur Bewältigung der primär technischen Herausforderungen richtete die Arbeit im Refabrikations-Leistungsbereich Teilebereitstellung ihr Augenmerk auch noch auf organisatorische-logistische Verbesserungspotentiale unter dem Blickwinkel eines anzustrebenden eher industriellen und seriellen Refabrikationsgeschehens gegenüber einer individuellen Injektoreninstandsetzung. Der zugehörig entwickelte neue Optimierungsansatz zur Senkung von Kosten, Umweltwirkungen und nicht zuletzt auch administrativem Aufwand in einem mittelständischen Refabrikationsunternehmen leistet entsprechend einen Beitrag, der wiederum eher auf die erfolgreiche Verwirklichung auch unternehmerischer Ziele mit der Injektoren-Refabrikation abhebt.

Eine Synthese der vorstehend zusammengefassten, erfolgreich betriebenen Entwicklungen ergibt ein sowohl methodisch fundiertes als auch industriell anwendbares Wissensrepertoire und Handlungsgerüst für die Refabrikation von Einspritzsystemen und hier insbesondere Common Rail Injektoren.

Ansätze für weiterführende Arbeiten ergeben sich auf drei Feldern:

Zunächst interessieren Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Prüf- und Diagnosemöglichkeiten von Injektoren, auch im undemontierten Zustand. Denkbar wäre

die Entwicklung und Anwendung hochauflösender bzw. mikroskopischer computertomographischer Verfahren zur Detektion von geometrischen Verschleißerscheinungen und/oder Kontaminationen im Inneren – sofern diese für das mitteständische Refabrikationsunternehmen zugänglich bzw. erschwinglich gemacht werden können. Andernfalls empfiehlt sich als zweites Feld die Intensivierung der Kooperation zwischen Injektoren-Herstellern und Refabrikanten, um sowohl Knowhow als auch Investitionen so zu teilen, dass Kosten gesenkt (und Kundenzufriedenheit gesteigert) werden können – eine Option, die bis zu einem gewissen Grad auch durch intensive Kooperationen zwischen Refabrikationsunternehmen nutzbar wäre, wenn im Interesse des Ganzen dann bestimmte finanzielle Lasten bzw. Investitionen und technologische Risiken auf mehrere Schultern verteilt werden können. Als drittes Feld für weiterführende Arbeiten sei im Ausblick an dieser Stelle nochmals die bereits in der Arbeit anskizzierte erforderliche Neu- oder Weiterentwicklung von Montage- und Justiermöglichkeiten für bestimmte Injektorenbaugruppen zueinander bzw. die Realisierung zugehöriger Betriebsmittel genannt. Damit kann die Demontagetiefe erhöht, die frei wählbare Paarung wiederverwendbarer Injektorenbaugruppen ermöglicht, die Regenerationsrate von Injektoren insgesamt signifikant gesteigert und damit die Injektoren-Refabrikation auf ein technologisches Niveau angehoben werden, wie es bisher nur bei hinsichtlich Präzision und Filigranität anspruchsloseren Refabrikationsprodukten gelungen ist.

## 11. Conclusion and Outlook

As a result of economic and ecological drivers a substantial growth in the field of remanufacturing will take place in future – regarding quality as well as quantity.

An essential requirement for this development is a technological portfolio of remanufacturing which keeps pace with the latest manufacturing innovations of product related and production related natures, in the present case focused on the automotive industry.

This dissertation contributes to this requirement by publishing the first ever written scientific work in the field of technological development for remanufacturing of (Common Rail) injection systems.

In the first step the major aims of this work are highlighted and specified by breaking them down to sub-targets. Hereupon a structured methodology is elaborated which is divided into work packages and bases on the rules of engineering. The state-of-the-art is illustrated to focus the uncharted technological and scientific territory.

Doing this, the author decided to focus on the most challenging component in respect of technology: The Common-Rail injectors.

The subject and aim has been executed by developing a logical structure: On the one hand the technical process of the remanufacturing of injectors from the diagnosis in the workshop to the shipment of the remanufactured part have been dealt with chronologically. On the other hand immanent questions concerning optimality and cost-effectiveness of the business have been respected and answered as well.

By investigating large batches of Common-Rail injectors and undertaking relevant case studies, essential findings in the diagnosis and working procedures have been developed: Improvements in the field of failure diagnosis procedures in workshops, safer deliveries to remanufacturing companies and optimisation in the communication between all members of the remanufacturing supply-chain have been developed and solutions are presented.

One cross-cutting question of this work has been executed in a very detailed way in a separate chapter: The systematic assessment of the suitability of Common-Rail injectors for remanufacturing. By using existing scientific decision-making aids and further specific criteria developed as a part of this work, remanufacturing of Common-Rail injectors could be pointed out as a very promising and seminal business segment of a remanufacturing company. Providing that the relevant technologies are available or are developed.

The development of remanufacturing technology is one further focus of this work and has been divided into three remanufacturing performance areas: First the technologies for the recovery of parts (with the process steps initial check, disassembly, cleaning,

testing and sorting), second the technologies for parts preparation and coherent logistics (with the process steps appraisal, reconditioning and commissioning) and third the final assembly (with the process steps re-assembly, final testing and codification).

In all three remanufacturing performance areas it became obvious that the remanufacturing of Common-Rail injectors shows different and higher demands on the process design in comparison to the industrial remanufacturing process of other automotive parts. Here new ways had to be found, handled and used.

It was only possible to meet these demands by developing and testing new process constellations of automotive remanufacturing. This has been done by building up appropriate workstations including the corresponding machinery and verifying the feasibility of the innovative technology by tests in situ. The author has been able to proceed these tests in a remanufacturing company run by himself as CEO.

This work does not only deal with the handling of technical challenges of the remanufacturing production process. It focusses as well on logistic and administration process steps and shows optimisation possibilities for the serial production of remanufactured Common-Rail injectors. The challenges to optimise costs, to find ecological solutions and to reduce administrative effort support the overall aim to find convincing business solutions for the remanufacturing of injectors.

The synthesis out of the performed developments and innovations described in this work is delivering a methodologically sound repertoire of knowledge for the remanufacturing of injection systems and especially Common-Rail injectors.

Incentives for further developments can be identified in three different fields:

In the first field it would be of interest to find further testing and analysing procedures for non disassembled injectors. A possibility could be the development and application of high-definition, microscopic computed tomography to detect geometric wear and contamination. Of course, such solutions should be available and affordable for small and medium-sized companies. If not, a second field of investigation could be the intensification of cooperations between manufacturers of injectors and remanufacturing companies. This option to share knowhow and investments to reduce cost and raise the customer satisfaction could also be of interest for networks of several injector remanufacturing companies. A third field of investigation is the process step of assembly, in which innovation and improvements are possible, here especially in the field of adjustment and joining of components. By doing this, the depth of disassembly could be enlarged. The possibility to combine parts from different core parts would raise the efficiency and parts reuse ratio and the remanufacturing of Common-Rail injectors would improve: The technological standard of injector remanufacturing would rise to a higher level as a whole.





## 12. Abkürzungsverzeichnis

ATO	Assemble to Order
EDC	Electronic Diesel Control
EOBD	Electronic On Board Diagnostics
HK	Handlingkosten
IMA	Injektor-Mengen-Abgleich
MIL	Malfunction Indicator Lamp
MTBF	Mean Time Between Failures
OBD	On Board Diagnose
OFD	Off-Board-Diagnostic
RFID	Radio-Frequency Identification Device
RLK	Rückführlogistikkosten
TK	Transportkosten
ZDK	Zentralverband des Deutschen Kraftfahrzeuggewerbes

## 13. Symbolverzeichnis

$Ba$	Bauteileanzahl pro Produkt
$Bm$	Bauteilmenge
$Bm_D$	Bauteilmenge zur Demontage
$Bm_M$	Von der Teilebereitstellung hervorgebrachte Bauteilmenge
$Bm_P$	Bauteilmenge zur Prüfung
$Bm_R$	Bauteilmenge zur Reinigung
$Bm_T$	Bauteilmenge der Teilebereitstellung
$Bm_{a(n)}$	Menge aufarbeitbarer Bauteile der lfd. Nr. n.
$Bm_{d(n)}$	Menge direkt wiederverwendbarer Bauteile der lfd. Nr. n.
$Bm_{e(n)}$	Menge zu erneuernder Bauteile der lfd. Nr. n.
$Bm_{u(n)}$	Menge unbrauchbarer Bauteile der lfd. Nr. n.
$EC$	Ergänzungscharge
$EC_{opt}$	Optimale Ergänzungscharge unter Kosten-/Aufwand- und Umweltaspekten
$Kt$	Anzahl Kleinteile
$P_a$	Prozentsatz aufarbeitbarer Bauteile
$P_d$	Prozentsatz direkt wiederverwendbarer Bauteile
$P_u$	Prozentsatz unbrauchbarer Bauteile
$Ram$	Refabrikationsauftragsmenge
$R_{E/A}$	Relation von Einlieferungsmenge zur Auslieferungsmenge
$Wb$	AnzahlWertbauteile

## 14. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Motorisierungsgrade und Produktion PKW weltweit .....	1
Abbildung 2: Mengenwachstum und Variantenwachstum fertigungstechnischer Produktionen .....	2
Abbildung 3: Produkt- und Prozessvarianten in Refabrikationsunternehmen .....	4
Abbildung 4: Rudolf Diesel .....	5
Abbildung 5: Typische Leistungs- und Drehmomentsverläufe 2-Liter-Vierzylinder-Benzinmotor/Dieselmotor .....	6
Abbildung 6: PKW-Bestände und Dieselanteile 2015 in ausgewählten Regionen, weltweit.....	7
Abbildung 7: Zulässiges Spiel beispielhafter Bauteile im Antriebsstrang .....	8
Abbildung 8: Anzahl Kfz-Komponenten der PKW im Verkehr in Deutschland vs. Anzahl zugehöriger Refabrikations-/„Reparatur-“ Unternehmen .....	9
Abbildung 9: Lösungsweg .....	12
Abbildung 10: Technische Entwicklungslinien Dieseleinspritzungen .....	14
Abbildung 11: Verbrennungsverlauf eines Common Rail Dieselmotors mit Voreinspritzung.....	16
Abbildung 12: Common Rail Einspritzanlage 1. Generation.....	17
Abbildung 13: Common Rail System mit Piezo-Injektoren.....	19
Abbildung 14: Injektoren-Bauarten und -Baugruppen.....	21
Abbildung 15: Bau- und Funktionsweise eines Pumpe-Düsen-Elements.....	22
Abbildung 16: Portfolio aktueller Refabrikationsprodukte.....	23
Abbildung 17: Marktportfolio-Entwicklung für Kfz-Refabrikationsprodukte .....	25
Abbildung 18: Erzielbare technische Sauberkeit von Refabrikationsprodukten.....	26
Abbildung 19: Prozessschritte der Refabrikation .....	27
Abbildung 20: Gliederung der fünf (sechs) Prozessschritte der Refabrikation in drei Leistungsbereiche.....	28
Abbildung 21: Arbeitszeitverteilung in Kfz-Werkstätten.....	30
Abbildung 22: Inländischer Wertschöpfungszuwachs durch Refabrikation .....	32
Abbildung 23: Düsenkörper-Erscheinungsbild bei Motorfehlern.....	33
Abbildung 24: Einstufung der Eignung und Anwendung etablierter Methoden der Qualitätssicherung und Qualitätstechnik für Injektoren .....	34

Abbildung 25: Mechatronische Systemübersicht Common-Rail-Einspritzung .....	38
Abbildung 26: Begriffe zu Mängeln technischer Systeme und zeitliche Abfolge nach Westkämper .....	40
Abbildung 27: Offboard- und Onboard-Kfz-Diagnose .....	42
Abbildung 28: Ablauf einer geführten Kfz-Fehlersuche .....	43
Abbildung 29: Injektorendiagnose anhand der Korrekturmengen .....	43
Abbildung 30: Mehrmals-Einspritzung und Abgas-Beeinflussung .....	44
Abbildung 31: Materialerosion durch Kavitation .....	45
Abbildung 32: Kfz-Werkstatt-Informationen zum Injektoren-Vorleben .....	47
Abbildung 33a: Injektoren-Eingangsprüfung bei Volllast .....	48
Abbildung 33a: Injektoren-Eingangsprüfung bei Teillast .....	49
Abbildung 33a: Injektoren-Eingangsprüfung bei Leerlauf .....	50
Abbildung 34: In-Situ-Reinigung von Injektoren .....	52
Abbildung 35: Beschädigungsfreier Ausbau verkrusteter Injektoren .....	54
Abbildung 36: Beschädigung elektrischer und/oder hydraulischer Injektoranschlüsse .....	55
Abbildung 37: Verformungen von Düsen und/oder Verkokungen von Sitzen .....	56
Abbildung 38: Eignungsevaluierung nach technischen Kriterien .....	58
Abbildung 39: Eignungsevaluierung nach Mengenkriterien und Logistikaufwand ..	59
Abbildung 40: Eignungsevaluierung nach Wertkriterien .....	60
Abbildung 41: Ausfallverteilung von Common Rail Injektoren .....	62
Abbildung 42: Eignungsevaluierung nach Zeitkriterien .....	63
Abbildung 43: „DIAMOND-LIKE-COATING“ .....	64
Abbildung 44: Sicherheitsrelevanz von Refabrikationsprodukten .....	65
Abbildung 45: Wettbewerb im Ersatzteilgeschäft .....	68
Abbildung 46: Refabrikations-Portfolio bezüglich technologischer Ansprüche .....	69
Abbildung 47: Sortiment Injektoren eines mittelständischen Refabrikationsunternehmens .....	70
Abbildung 48: Injektoren-Refabrikation: Leistungsbereich Teilegewinnung .....	72
Abbildung 49: Reinraumanforderungen für die Injektoren-Refabrikation .....	73

Abbildung 50: Kostenauswirkungen eines Refabrikations-Abbruchs in Abhängigkeit vom Abbruchzeitpunkt .....	74
Abbildung 51: Aufbau des für die präsentierten Technologieentwicklungen herangezogenen Beispiel-Injektors.....	76
Abbildung 52: Elektrische Prüfung vor der Demontage .....	77
Abbildung 53: Injektorenreinigung und Prüfung vor der Demontage .....	78
Abbildung 54: Rücklaufmengenmessung vor der Demontage.....	79
Abbildung 55: Ultraschallreinigung der Injektoren-Einzelteile mit dreistufiger Reinheitskaskade des Reinigungsmediums (Prüföl) .....	81
Abbildung 56: Injektoren-Refabrikation: Leistungsbereich Teilebereitstellung .....	84
Abbildung 57: Injektoren-Befundung anhand von Grenzmustern .....	87
Abbildung 58: Bauteil-Mengenflüsse in der Refabrikation.....	92
Abbildung 59a: Aufwandsverringerung durch Erhöhung der Einlieferungsmengen ..	94
Abbildung 59b: Kostenbeeinflussung durch Erhöhung der Einlieferungsmengen ..	95
Abbildung 60: Charakteristischer Kostenverlauf der Injektoren-Refabrikation bei Variation der Relation Einlieferungsmenge/Auslieferungsmenge .....	97
Abbildung 61: Überzähligkeit von aufarbeitbaren/verwendbaren Bauteilen bei sukzessiver Erhöhung der Relation Einlieferungs-/Auslieferungsmenge.....	99
Abbildung 62: Amortisationszeiten einer neu entwickelten Abstands- Justiereinrichtung für Aktormodul zu Injektorkörper auf 1 $\mu$ .....	102
Abbildung 64: Drehmoment - und Drehwinkeldefinierte Montage der Düseneinheiten an die Injektoren.....	105
Abbildung 65: Prüfstation zur Injektoren-Dichtheitsprüfung nach der Wiedermontage vor dem Prüfstandslauf.....	106
Abbildung 66: Montage der wiedermontierten Injektoren auf dem Prüfstand .....	108
Abbildung 67: Vollautomatische Endprüfung auf zweimal täglich präzise kalibriertem Injektorenprüfstand.....	109
Abbildung 68: Codierungen des Injektor-Mengen-Abgleichs (IMA).....	110
Abbildung 69: Verpackungsstation für korrosionsgeschützte und transportsichere Injektoren-Auslieferung .....	111
Abbildung 70: Synthese der Entwicklungen .....	113

## 15. Literaturverzeichnis

- [BOL81] Bollinger, L.: Remanufacturing survey findings, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1981.
- [BOS99] BOSCH-Dokumentation: Das erste Jahrhundert bei BOSCH. BOSCH-Archiv, Stuttgart, 1999.
- [BUL03] Bullinger, H.-J.; Scheer, A.-W.: Service Engineering – Entwicklung und Gestaltung innovativer Dienstleistungen, Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [BUL09] Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung, 3., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2009.
- [DIN31] DIN31051, Instandhaltung – Begriffe, Beuth Verlag, Berlin, 1985.
- [DIN60] DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlerzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) (IEC60812:2006); Deutsche Fassung EN 60812:2006, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [DUN07] Dunkel, M.: Methodenentwicklung für Lean Remanufacturing, Dissertation, Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 9, Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [FRE07] Freiberger, S.: Prüf- und Diagnosetechnologien zur Refabrikation von mechatronischen Systemen aus Fahrzeugen, Dissertation, Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 6, Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- [FRI12] Fritsche, R.: Methodenentwicklung zur ganzheitlichen Rüstprozessoptimierung, Dissertation, Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 23, Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [GEI07] Geiger, W; Kotte, W.: Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme – Perspektiven, 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, 2007.
- [GIA10] Global Industry Analysts, Inc.: Automotive Remanufacturing – A Global Strategic Business Report, Global Industry Analysts, Inc., San Jose, California, USA, 2010.
- [GSC13] Gscheidle, R.: Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik. Verlag Europa-Lehrmittel, 30. neubearbeitete Auflage, Haan-Gruiten, 2013.
- [HAU03] Hauser, W.; Lund, R. T.: The Remanufacturing Industry; Anatomy of a Giant, Department of Manufacturing Engineering, Boston University, Boston, 2003.
- [HAU11] Haumann, M.: Variantenmanagement in der Refabrikation, Dissertation, Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 19, Shaker Verlag, Aachen, 2011.

- [JAK12] Jakobs, S.: Arbeiten im Team – als Reparatur-Experte für Diesel-Fahrzeuge!. COLER GmbH & Co. KG, Münster, 2012.
- [KAM82] Kaminsky, R.: Grunderneuerung – Produktrecycling, Kaminsky R, Stuttgart, 1982.
- [LUN84] Lund, R. T.: Integrated Resource Recovery – Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries, World Bank Technical Paper Number 31, UNDP Project Management Report Number 2, Washington D. C., 1984.
- [LUP13] Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik: <http://www.kfz-service-engineering-2020.de/>, Abruf am 10.07.2013, Bayreuth, 2013.
- [MÜN03] Münster, V.: Benchmarking in Unternehmen der spritzgießverarbeitenden Industrie – Stand der Forschung und Definition geeigneter Benchmarking-Bereiche, Diplomarbeit, Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2003.
- [MÜN15] Münster, V.; Steinhilper, R.: Remanufacturing Technology Developments for New automotive Products, Conference „Eco Design 2016“, Tokyo 12/2015
- [PFE14] Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Masing Handbuch Qualitätsmanagement, 6. überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [RAU10] Rauch, C.; Horx, M.: Megatrend Dokumentation. Zukunftsinstitut GmbH, Kelkheim, 2010.
- [REI10] Reif, K.: Moderne Diesel-Einspritzsysteme – Common Rail und Einzelzylindersysteme, Springer-Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [RIE12] Rieg, F.; Steinhilper, R.: Handbuch Konstruktion, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [SCH12] Schweinstig, S.: Technische Sauberkeit in der Refabrikation, Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 24, Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [STE12a] Steinhilper, R.: Service Engineering. In: Handbuch Konstruktion Herausgeber: Rieg, F.; Steinhilper, R., Carl Hanser Verlag, München, 2012.
- [STE12] Steinhilper, R.: Remanufacturing – the View from Europe, In: World Remanufacturing Summit 2012 PARTNERING INDUSTRY & SCIENCE, Tagungsband, Bayreuth, 2012.
- [STE86] Steinhilper, R.; Grundler, G.; Zöllner, S.: Recycling durch Aufarbeitung technischer Produkte in Austauschserzeugnisfertigung. Phase I und II, BMTF-FB-T, Stuttgart, 1986.
- [STE88] Steinhilper, R.: Produktrecycling im Maschinenbau. Dissertation, IPA-IAO Forschung und Praxis, Springer-Verlag, Berlin, 1988.



- [STE93] Steinhilper, R.; Hudelmaier U.: Erfolgreiches Produktrecycling zur erneuten Verwendung oder Verwertung – Ein Leitfaden für Unternehmen. Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft (RKW), Eschborn, 1993.
- [STE99] Steinhilper, R.: Produktrecycling - Vielfachnutzen durch Mehrfachnutzung. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1999.
- [SUN04] Sundin, E.: Product and Process Design for Successful Remanufacturing. Dissertation, Lindköpings Universität, Schweden, Lindköping, 2004.
- [TUN14] TUNAP: <http://www.tunap.com/tunap-mobility/sortiment/kraftstoffsystem/>, Abruf am: 05.11.2014, Wolftrathhausen, 2014.
- [VDI84] VDI 2243, Recyclingorientierte Gestaltung technischer Produkte, Beuth Verlag, Berlin, 1984.
- [WAR86] Warnecke, H.-J.; Steinhilper, R.: Wachstumsbranche Produktrecycling? – Produkte, Verfahren, Märkte. In: Wirtschaft und Umwelt, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr, München, 1986.
- [WEI08] Weiland, F.: Remanufacturing Automotive Mechatronics & Electronics, Editions FJW Consulting, Köln, 2008.
- [WES97] Null-Fehler-Produktion in Prozessketten – Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Kompensation. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
- [WIK15] Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Common-Rail-Einspritzung>, Abruf am 04.01.2015, Bonn, 2015.
- [WIL12] Williamson, I. A.: Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Markets, and Trade. United States International Trade Commission, USITC Publication 4356, Washington, 2012.
- [WRO07] Wrobel, S.: Reaktionstechnische Untersuchungen zur thermischen Reinigung verbrauchter Automobilkomponenten für die Refabrikation, Dissertation, Fortschritte in Konstruktion und Produktion, Band 8, Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- [ZDK13] ZDK, Deutsches Kraftfahrzeuggewerbe, <http://www.kfzgewerbe.de/>, Abruf am 10.07.2013, Bonn, 2013.

# 16. Anhang

## 16.1 Zahlengrundlagen der Abbildung 39

<b>Produkt</b> <b>Logistik-Kennwert</b>	<b>Anlasser/ Licht- maschine</b>	<b>Kupplung</b>	<b>4-Zyl.- Motor</b>	<b>Wasser- pumpe</b>	<b>Injektor</b>	<b>Turbo- lader</b>
<b>Gewicht [kg]</b>	4	4	150	1	0,5	2
<b>Handlingdauer [min]</b>	2	2	10	2	2	2
<b>Anzahl p. a. Einzugsbereich EU [Stück]</b>	2 Mio	1 Mio	0,5 Mio	0,2 Mio	0,1 Mio	0,05 Mio
<b>Handlingkosten</b>	0,40 € pro Minute					
<b>Transportkosten LKW</b>	0,50 € pro Tonnenkilometer					
<b>Transportkosten Bahn</b>	0,20 € pro Tonnenkilometer					
<b>Transportkosten See</b>	0,10 € pro Tonnenkilometer					
<b>Logistikauf- wand</b>	Handlingkosten plus Transportkosten					
<b>Logistikkosten für 300 km [€]</b>	1,40	1,40	26,50	0,95	0,87	1,10

## 16.2 Zahlengrundlagen der Abbildung 40

<b>Produkt</b> <b>Kennwert</b>	<b>Anlasser/ Licht- maschine</b>	<b>Kupplung</b>	<b>4-Zyl.- Motor</b>	<b>Wasser- pumpe</b>	<b>Injektor</b>	<b>Turbo- lader</b>
<b>Materialwert [WE]</b>	10	4	30	4	1	10
<b>Fertigungswert [WE]</b>	20	8	270	8	35	110
<b>Recycling- Wirkungsgrade [%]</b>						
- Material- recycling	90	95	95	90	95	90
- Produkt- recycling	80	90	80	70	80	60
<b>Endver- braucher-Preise [WE]</b>						
- Neuteil	300	120	3000	120	360	1200
- Austauschteil	180	72	1800	72	216	720

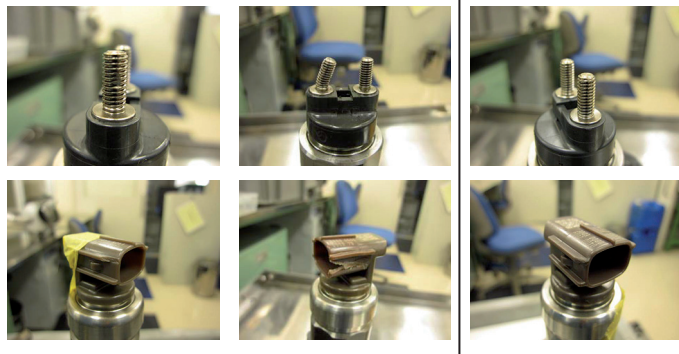
WE = Währungseinheiten

## 16.3 Grenzmuster für Befundung und Aufarbeitung

### 16.3.1 Aktormodul

#### Elektrische Anschlüsse

akzeptabel ←→ nicht akzeptabel



#### Außenhaut

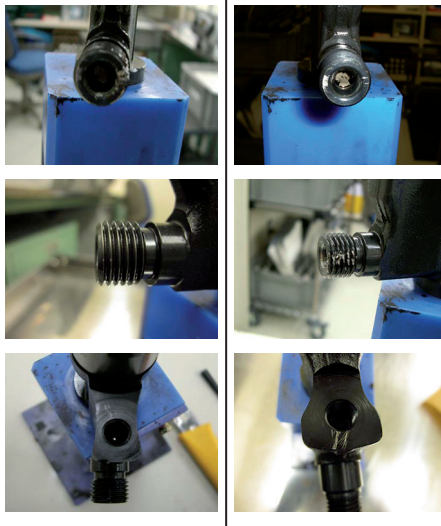
akzeptabel ←→ nicht akzeptabel



## 16.3.2 Injektorkörper

### Dichtflächen Hochdruck- und Rücklaufanschlüsse

akzeptabel  $\longleftrightarrow$  nicht akzeptabel



### Außenhaut

nicht akzeptabel



### 16.3.3 Düsennadelbewegung

#### Steuerkolben

akzeptabel: noch glänzende Oberfläche



nicht akzeptabel: matte Oberfläche



nicht akzeptabel: starke Kratzer





## Lebenslauf

Name	Volker Münster
Geburtsdatum	22. Oktober 1963
Geburtsort	Prüm/Eifel

### Beruflicher Werdegang

seit 02/2015	Schindler Deutschland AG & Co.KG, Berlin Head Technical & Field Support, Verantwortung für Technik und Qualität für die deutsche Konzerngesellschaft
08/2014 – 01/2015	Hess Gruppe GmbH & Co. KG, Köln Mitglied der Geschäftsleitung mit Zuständigkeit für Industrieteile, Technik und Produktion
10/2009 – 07/2014	BU Bucker Unternehmensgruppe GmbH & Co. KG, Ibbenbüren Geschäftsführer/COO
09/2007 – 07/2014	BU Power Group GmbH, Ibbenbüren Geschäftsführer/COO, Minderheitsgesellschafter
09/2007 – 07/2014	BU Drive GmbH, Köln Geschäftsführer/CEO, Minderheitsgesellschafter
08/1997 – 09/2007	Schmitz + Krieger GmbH, Köln Geschäftsführer, Minderheitsgesellschafter
09/1987 – 08/1997	Erasmus + Willms GmbH, Aachen Ab 09-1987 halbtags Koordination des Bereichs Motorsport; ab 07-1989 kaufmännischer Mitarbeiter im Auftragswesen; ab 1993 Prokurist und ab 1997 Geschäftsführer

### Studium

10/1983 – 07/1991	Studium des Maschinenbaus, Fachrichtung Kunststoffverarbeitung (IKV) RWTH, Aachen
-------------------	---



### **Wehrdienst**

07/1982 – 10/1983 Wehrdienst beim Panzerbataillon 343 der Bundeswehr  
Augusta-Kaserne Koblenz

### **Schulbildung**

09/1973 – 06/1982 Peter-Wust-Gymnasium, Wittlich a. d. Mosel  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

### **Berufliche Nebentätigkeiten:**

01/2007 – 06/2010 Vorstand, Verband der Motoreninstandsetzungsbetriebe e. V.,  
Ratingen

08/2009 – 06/2011 Rheinische Fachhochschule, Köln  
Lehrbeauftragter an den Lehrstühlen für  
Wirtschaftswissenschaften und Ingenieurwissenschaften  
Fächer : Supply Chain Management; Produktionscontrolling

Köln, im Oktober 2015

Volker Münster









